



Практические применения газотермических технологий нанесения защитных покрытий.

Руководство для инженеров

Март, 2009 г.

ВВЕДЕНИЕ

Газотермические технологии нанесения покрытий являются одним из способов обработки поверхности материалов, которые используются уже в течение нескольких десятилетий. Основное назначение газотермических покрытий для машиностроения можно проиллюстрировать следующими примерами:



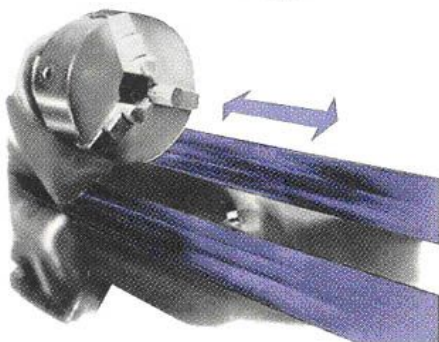
Твёрдые подшипники скольжения

Опоры валков, вал рабочего колеса, ось якоря, износостойкие втулки, лопаточное колесо насоса топлива



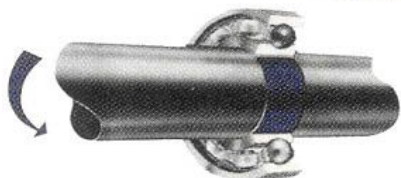
Мягкие подшипники скольжения

Бронзовый подшипник, направляющие поршня, опорный сегмент в подшипнике, втулки гидропресса



Поверхности скольжения

Станина токарного станка, кольца и пластины износа



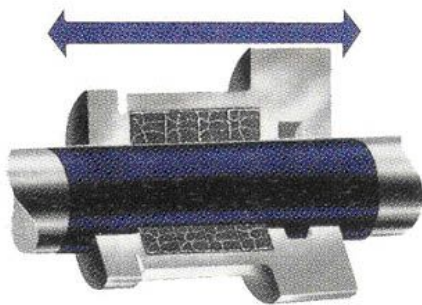
Посадочные места

Прессовая или стяжная посадка, посадка подшипника, редукторы, высокотемпературные применения, например, в ракетной технике



Кавитация

Кольца износа для гидротурбин, цилиндрические втулки для дизелей, корпуса центробежных насосов



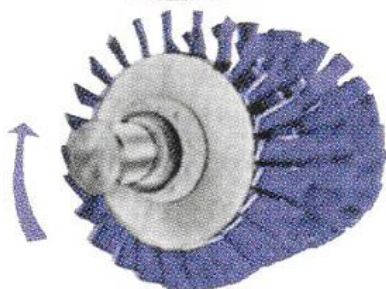
Уплотнительные поверхности

Набивные уплотнения, вращающиеся графитовые уплотнения насосов, плунжеры насосов, полирующие приспособления



Твёрдые поверхности

Тянущие барабаны стана для проволоки, скользящие и режущие ножи, раскатные валки, уплотнения насосов



Гидро-газоабразивный износ

Лопатки вентилятора, гидроэлектрический клапан, пылевой циклон

Следует отдельно отметить высокую эффективность применения газотермических покрытий для защиты от коррозии в различных средах (индустриальной, морской, кислотнo-щелочной и т.д.), в том числе, от коррозии различных строительных конструкций и резервуаров. Также в комбинации с различными красками и мастиками.

Известны применения газотермических покрытий в электротехнической и электронной промышленности, в авиационной и ракетной технике, при создании новых материалов и конструкций («корковые изделия»).

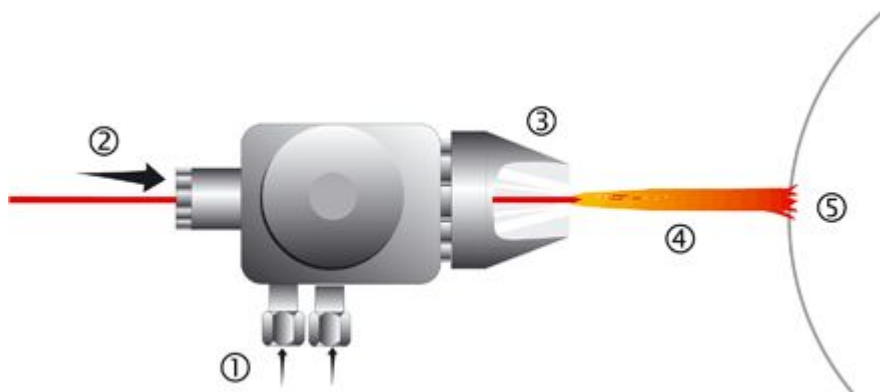
Свойства газотермических покрытий (механические, электрические, теплофизические, оптические и другие) в силу строения и их образования принципиально отличаются, например, от литой структуры металла.

Свойства покрытий определяются условиями их формирования. Частицы напыляемого материала размером 5 – 200 мкм, при большинстве способов напыления находясь в расплавленном состоянии, с высокой скоростью 50 – 1000 м/сек ударяются о напыляемую поверхность (подложку) практически холодную. Происходит расплющивание этих частиц и иногда частичное разбрызгивание. При этом они резко охлаждаются со всеми возможными последствиями для формирования кристаллической или аморфной структуры расплющенной частицы. Эти расплющенные частицы (чешуйки) наслаиваются друг на друга, образуя чешуйчатую структуру покрытия. Чешуйки отделены друг от друга окисной плёнкой, которая в ряде случаев образует керамический каркас покрытия. Именно эти особенности формирования и строения газотермических покрытий и определяют их уникальные свойства.

Общим для всех газотермических покрытий является наличие диспергированного напыляемого материала, ускоряемого газовой струёй. Термин «газотермические технологии» в настоящее время объединяет следующие способы нанесения покрытий:

Газопламенное напыление проволокой или стержнями

При газопламенном напылении проволокой или стержнями распыляемый материал непрерывно подаётся в центр ацетилен-кислородного пламени и там оплавляется. С помощью распыляющего (диспергирующего) газа, например, сжатого воздуха или азота, расплавленные капли выдуваются из зоны плавления и ускоряются в направлении подготовленной детали. Газопламенное напыление проволокой является одним из самых распространенных способов с очень высоким качеством покрытия. В автомобилестроении ежегодно более сотни тонн молибдена напыляется на вилки переключателей, кольца синхронизации и поршневые кольца.



Газопламенное напыление проволокой

(1) Ацетилен/Кислород (2) Проволока или стержень (3) Сопло
(4) Ацетилен/кислородное пламя и напыляемый материал (5) Деталь

Термическая энергия: макс 3160 °С; кинетическая энергия: до 200 м/сек; производительность 6-8 кг/час

Газопламенное напыление порошком

При газопламенном напылении порошком порошкообразные частицы напыляемого материала плавятся или оплавляются в ацетилен-кислородном пламени и с помощью расширяющегося горючего газа ускоряются в направлении подготовленной поверхности детали.

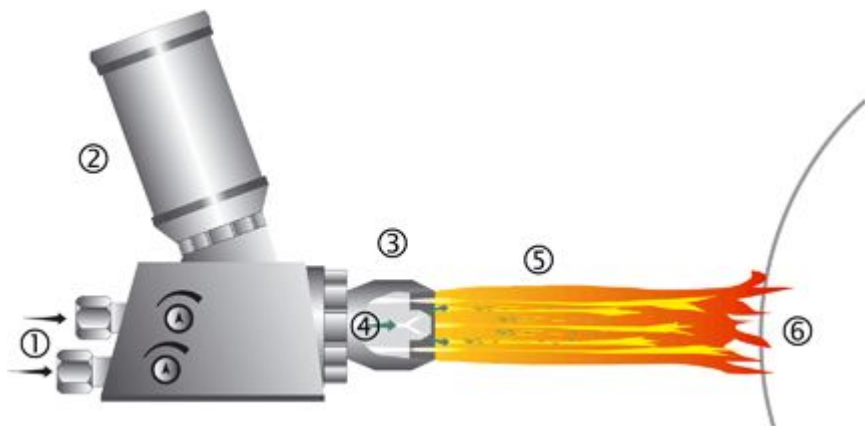
Если требуется, то для ускорения порошка можно использовать ещё дополнительный газ (например, аргон или азот). Существует более 100 различных порошковых материалов.

Среди порошков различают самофлюсующиеся и термореагирующие порошки. Для самофлюсующихся обычно требуется дополнительная термообработка оплавлением ацетилен-кислородной горелкой.

Термореагирующие порошки используют для подслоя, увеличивающего прочность сцепления покрываемой поверхности и основного покрытия. Термореагирующими их называют в связи с тем, что исходная частица состоит из двух «склеенных» частичек разнородных материалов, которые при нагревании в газовой струе вступают в реакцию образования интерметаллида с выделением тепла, например, Ni-Al, Al-Fe и т.д.

Области применения: втулки переключения, ролики рольгангов, посадочные места подшипников, вентиляторы, роторы шнеков и т.д.

Газопламенное напыление порошком



(1) Ацетилен/Кислород (2) Ёмкость с порошком (3) Сопло
(4) Газ + Порошок (5) Ацетилен-кислородное пламя и напыляемые частицы (6) Деталь

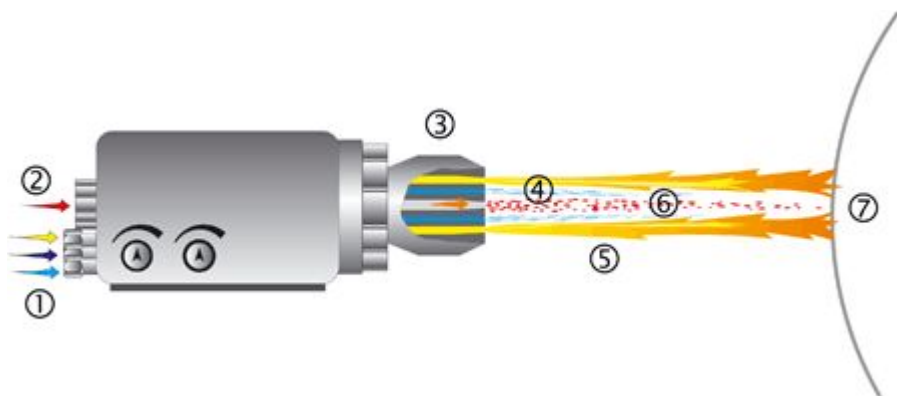
Термическая энергия: макс 3160 °С; кинетическая энергия: до 50 м/сек; производительность 1-6 кг/час

Газопламенное напыление пластиков

Газопламенное напыление пластиков отличается от других газопламенных технологий тем, что при этом способе пластик не имеет прямого контакта с ацетилен-кислородным пламенем. В центре газопламенного пистолета имеется подающее газопламенное сопло. Вокруг два кольцевых сопла. Внутреннее для воздуха или инертного газа, внешнее кольцо для энергоносителя, ацетилен-кислородного пламени.

Процесс оплавления пластика происходит не прямо от пламени, а от нагретого воздуха и излучения.

Применение: перила, кирпичные трубопроводы, ёмкости для воды, садовая мебель, маркировка бассейнов и т.д.



Газопламенное напыление пластиков

- (1) Ацетилен/Кислород (2) порошок пластика (3) сопло с горячим газом
(4) воздушная защита (5) Ацетилен-кислородное пламя
(6) оплавленный пластик (7) Деталь

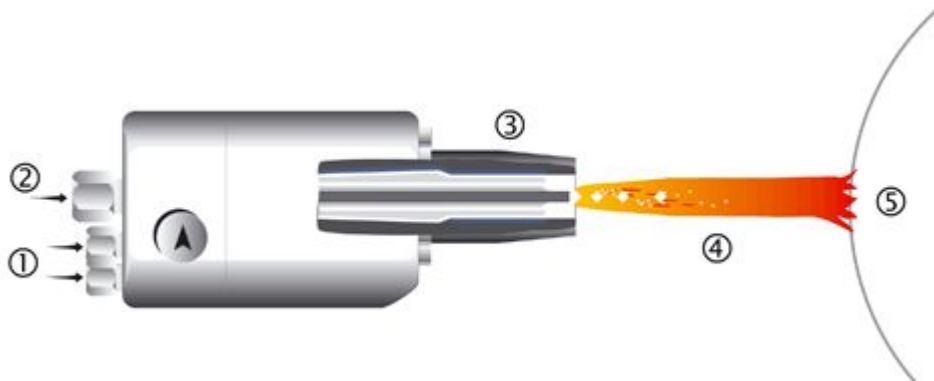
Термическая энергия: макс 3160 °C; кинетическая энергия: до 30 м/сек; производительность 2-4 кг/час

Сверхзвуковое газопламенное напыление (HVOF)

При сверхзвуковом газопламенном напылении происходит постоянное горение газа при высоком давлении внутри камеры сгорания, на ось которой подаётся порошкообразный напыляемый материал. Создаваемое высокое давление в камере сгорания смесью горячего газа и кислородом обеспечивает дальше в профилированном сопле необходимую высокую скорость газового потока. Благодаря этому напыляемые частицы ускоряются до больших скоростей, что ведёт к образованию чрезвычайно плотных и с отличной адгезией покрытий. Достаточная, но медленно вводимая температура приводит в процессе напыления к только незначительным металлургическим изменениям, например, минимальное образование твёрдого раствора карбидов. При этом способе напыления получаются экстремально тонкие покрытия с высокой точностью размеров.

В качестве горючих газов можно использовать пропан, этан, ацетилен, водород и другие газы.

Применение: поверхности скольжения в парогенераторах, вальцы фотоиндустрии, детали нефтехимического и химического оборудования, например, насосы, шиберы, шаровые краны, механические уплотнения и т.д.



Сверхзвуковое газопламенное напыление

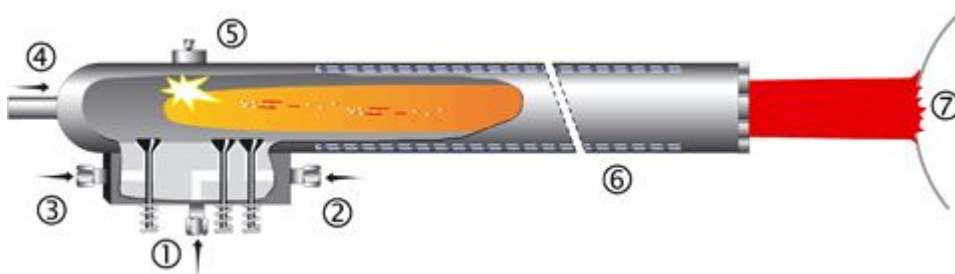
- (1) горючий газ/кислород (2) Порошок + газ
(3) Сопло с или без охлаждения водой
(4) Горючий газ/кислородное пламя и напыляемые частицы (5) Деталь

Термическая энергия: макс 3160 °С; кинетическая энергия: до 550 м/сек; производительность 2-8 кг/час

Детонационное напыление

Напыление ударом пламенем является прерывистым периодическим процессом напыления. Так называемые детонационные пушки состоят из выходной трубы, на конце которой находится камера сгорания. В неё вводится газопорошковая (ацетилен-кислород-порошок) смесь, поджигаемая искрой. Образующаяся в трубе ударная волна ускоряет напыляемые частицы. Они нагреваются в фронте пламени, ускоряются до высоких скоростей в направлении подготовленной детали. После каждой детонации производится очистка камеры и трубы азотом. Очень высокое качество покрытий оправдывает во многих случаях высокие финансовые расходы.

Применение: плунжеры насосов в газовых компрессорах или насосах, рабочее колесо в паровых турбинах, газовый компрессор или расширительная турбина, накатные вальцы бумажных машин или каландровые вальцы.



Детонационное напыление

- (1) Ацетилен (2) Кислород (3) Азот (4) Напыляемый порошок
(5) Устройство поджига (6) Выходная труба с водяным охлаждением (7) Деталь

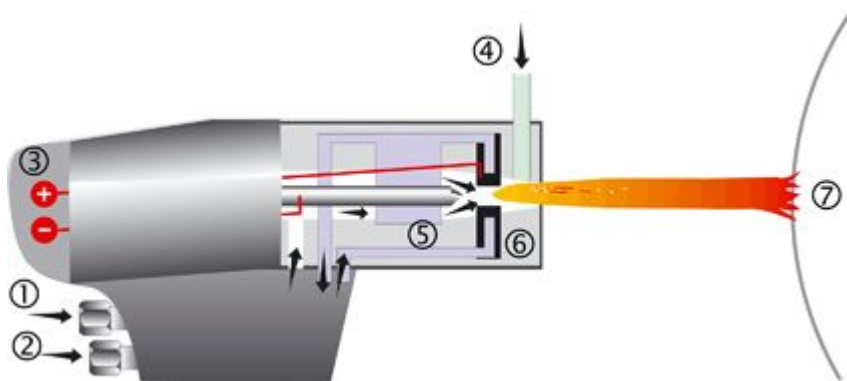
Термическая энергия: макс 3160 °С; кинетическая энергия: до 600 м/сек; производительность 3-6 кг/час

Плазменное напыление

При плазменном напылении порошок внутри или снаружи плазменного пистолета плавится плазменной струей и ускоряется в направлении покрываемой детали. Плазма генерируется электрической дугой, горящей в аргоне, гелии, азоте, водороде или их смеси. При этом происходит диссоциация и ионизация газов, они приобретают высокую скорость на выходе, и при рекомбинации отдают своё тепло напыляемым частицам.

Электрическая дуга горит между центральным катодом и водоохлаждаемым анодом. Этот способ используется при нормальной атмосфере, в защитном газе (например, аргоне), в вакууме и под водой. При соответствующем профилировании сопла возникает также сверхзвуковая плазма.

Применение: авиа- и космическая промышленность (например, лопатки турбин, плоскости входа) медицина (имплантаты), термобарьерное покрытие.

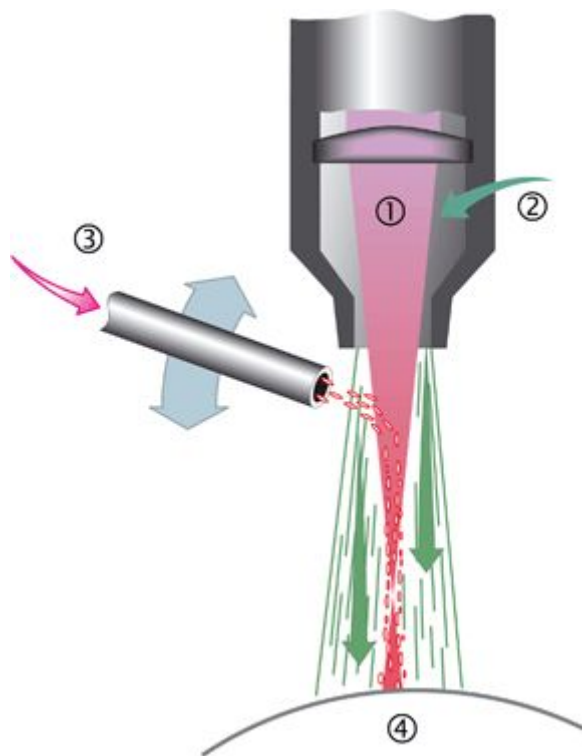


Плазменное напыление

(1) Инертный газ (2) Охлаждающая вода (3) Постоянный ток (4) Порошок
(5) Катод (6) Анод (7) Деталь

Термическая энергия: до 20000 °С; кинетическая энергия: до 450 м/сек; производительность 4-8 кг/час

Лазерное напыление



При лазерном напылении порошок вводится в лазерный луч через соответствующее сопло. Лазерным лучом порошок и малая часть подложки (микроны) плавятся, металлургически соединяются. Для защиты сварочной ванны служит защитный газ. Примерами применения этой технологии могут быть локальное покрытие штампов, гибочный инструмент, гильотина.

Лазерное напыление

(1) Лазерный луч
(2) Защитный газ
(3) Порошок
(4) Деталь

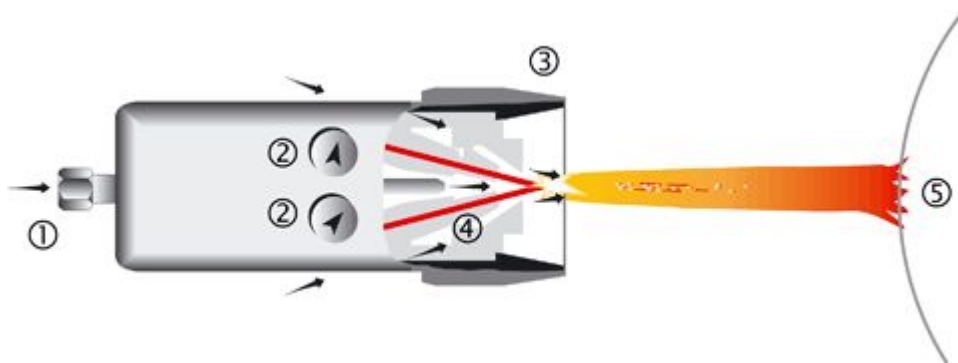
Термическая энергия: 10000 °С; кинетическая энергия: до 1 м/сек; производительность 1-2 кг/час

Электродуговая металлизация

При электродуговой металлизации две проволоки одинаковые или разные по составу плавятся электрической дугой, горящей между ними, и распыляющим (диспергирующим) газом, например, воздухом ускоряется в направлении покрываемой детали. Электродуговая металлизация процесс напыления с высокой производительностью, но пригоден только для распыления электропроводящих материалов. Перспективным является использование термореагирующих порошковых проволок.

При использовании при распылении азота или аргона окисление материалов не происходит.

Применение чрезвычайно широкое, например, покрытие ёмкостей, коррозионная защита металлоконструкций, восстановление изношенных деталей машин и механизмов и т.д.



Электродуговая металлизация

(1) Распыляющий газ (2) Подача проволоки регулируемая (3) Сопло
(4) Электропроводящая проволока (5) Деталь

Термическая энергия: до 4000 °С; кинетическая энергия: 150 м/сек; производительность 8-20 кг/час

Холодное напыление

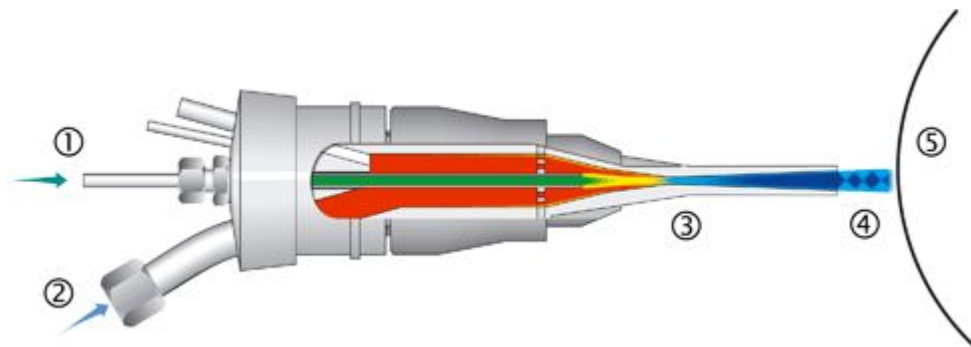
При холодном напылении речь идёт о новом поколении сверхзвукового газопламенного напыления. Кинетическая энергия напыляемых частиц при этом увеличивается, а термическая энергия уменьшается. Тем самым можно создавать почти полностью безоксидные покрытия.

Этот новый способ известен под именем CGDM (Cold Gas Dynamic Spray Method).

Порошок нагревается газовой струёй до 600° С соответствующим давлением ускоряется до скорости более 1000 м/сек и наносится непрерывным потоком на покрываемую поверхность. Поток частиц может фокусироваться от сечения размером 1,5 x 2,5 до 7 x 12 мм. Производительность напыления составляет от 3 до 15 кг в час.

Лабораторные исследования показывают, что этим способом производятся покрытия с экстремально высокой адгезией и чрезвычайно плотные. В отличие от других способов газотермического напыления, при которых порошок нагревается до температуры плавления, при холодном напылении порошок нагревается всего на несколько сот градусов. Поэтому окисления порошка и покрытия не происходит, содержание окислов в покрытии ничтожное. Материал покрытия не подвергается изменениям из-за теплового воздействия.

Применение: автомобилестроение, коррозионная защита, электроника.



Холодное напыление

(1) Транспортирующий газ (2) Технологический газ (3) Сопло Лавалья
(4) Сверхзвуковой поток газа с напыляемыми частицами (5) Деталь

Термическая энергия: макс 500 °С; кинетическая энергия: 550-1000 м/сек; производительность 6-8 кг/час

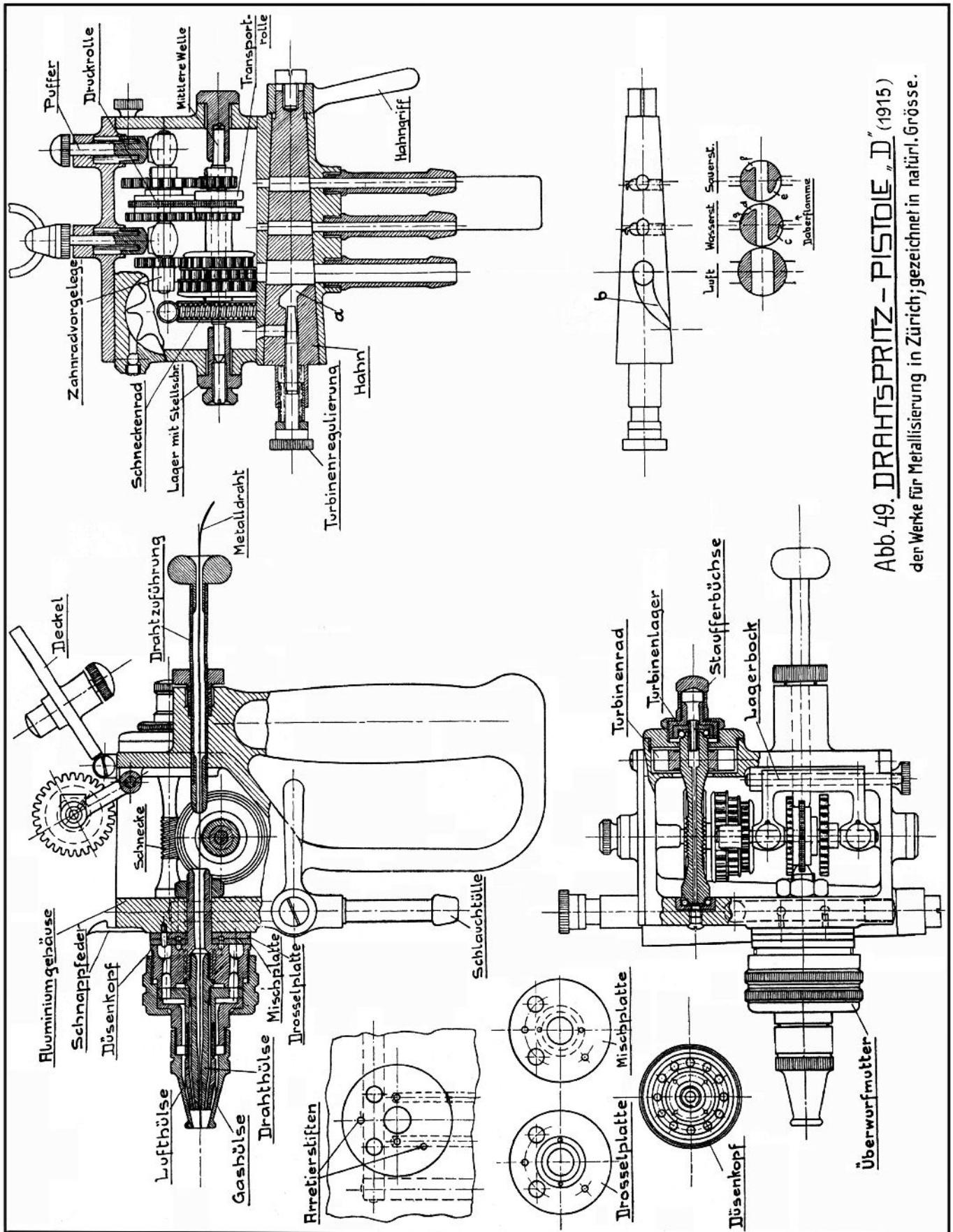


Abb. 49. **DRAHTSPRITZ - PISTOLE „D“** (1915)
der Werke für Metallisierung in Zürich; gezeichnet in natürl. Grösse.

Нанесение металлов напылением

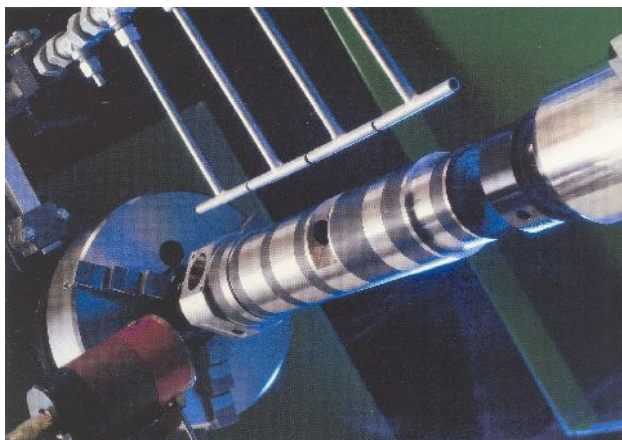
Назначение покрытий:

- улучшение коэффициента трения поверхности;
- повышение твердости или пластичности поверхности;
- защита от коррозии, эрозии, кавитации;
- температуростойкость и окалиностойкость;
- исправление деталей, сделанных с ошибками, и восстановление изношенных деталей до первоначального размера.

Преимущества:

- может быть создан практически любой состав покрытия для толщины покрытия от сотых долей до нескольких миллиметров;
- при нанесении покрытия основной материал нагревается обычно до температуры 100 – 150 °С, при этом не наступает изменение структуры и коробления;
- покрытие можно наносить на различные материалы вне зависимости от размеров деталей;
- тонкозернистое микропористое высококачественное покрытие имеет идеальные предпосылки для слоистых технологий.

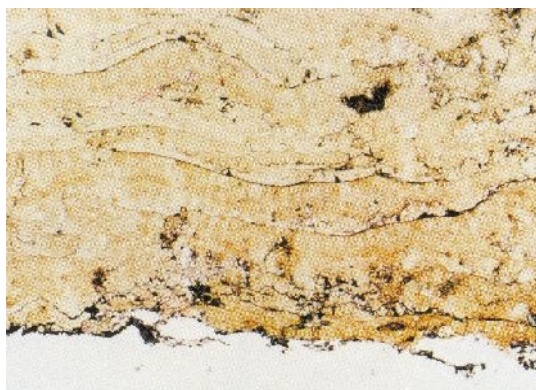
Вал гидropередачи в приспособлении для плазменного напыления



Сортировщик с износостойким молибденовым покрытием



500 – кратное увеличение молибденового покрытия



Кратко о материалах для напыления и области применения

Цинк (Zn)

Анодная защита на стали и в щелочной среде, воде до 60° С, используется при конструировании в обязательном порядке в машиностроении, горном строительстве и кораблестроении, для холодильных установок без опасности коробления. В сравнении с горячим цинкованием нет повреждения металла травлением. Слои, напылённые металлическим цинком значительно чище, чем полученные другими способами. Рекомендован DIN 8565.

Алюминий (Al) 99,5 – 99,9 %

Наряду с применением для коррозионной защиты алюминий используется и в других областях: покрытия для посуды (хорошая теплопроводность), в пищевой промышленности, при высоких температурах воды, кислотной атмосфере, для алитирования, как защиты от возгорания.

Сплав Al – Mg

Стойкий к морской воде, полируемые покрытия с высокой прочностью сцепления. Пригодны для пищевой промышленности, изготовления транспортных средств и тепловых приборов и устройств.

Олово – бронза (Sn – Bz)

В первую очередь для подшипников скольжения. Высокая износ- и коррозионная стойкость. Плотная структура напылённого покрытия, высокая чистота поверхности и превосходные антифрикционные свойства со сталью. Декоративные покрытия.

Медь (Cu)

Электротехника, экранирующие покрытия, покрытия транспортных роликов, бумажных валков, нажимных роликов, клеевых вальцев. Электропроводящие покрытия на непроводниках. Медные электроды для технологии искровой эрозии. Декоративные покрытия.

Латунь (Ms)

Покрытия валов и вальцев вместо массивной латуни. Значительное улучшение сцепления резины со сталью.

Подшипниковый материал (Zn-Sb-Cu)

Высококачественный материал на основе цинка, без усадочных и газовых пор, для подшипников с высокими статическими и динамическими нагрузками, отличные смазывающие свойства благодаря образованию на поверхности плёнки с высокой твёрдостью. Изготовление подшипников напылением значительно проще и экономичнее, так как обычно не требуется предварительная механическая подготовка вкладыша и литые толстые слои. Хорошая теплопроводность.

Олово (Sn)

Коррозионная защита ёмкостей для пищевой промышленности, разбавленных органических солей. Создание сопел напылением негативных моделей. Возможно напыление на дерево или гипс.

Никель (Ni)

Создание подслоя, буферного слоя, коррозионная защита сушильных цилиндров в бумажной промышленности. Ванны для двууглекислого натрия или паташа, насосы, химические аппараты.

Монель (Ni-Cu)

Сплав с низкой усадкой и высокой стойкостью к многим видам коррозии, обладает также относительной износостойкостью. Очень хорошо обрабатывается.

445 алюминиевая бронза (Cu-Al-Composite-Pulver)

Для мягких подшипниковых поверхностей с чрезвычайно высокой износостойкостью. Высококачественный термореагирующий материал. Хорошая прочность на острых кромках. Пригоден для тонких и толстых слоёв. Гладкая поверхность. Некоррозионностойкий.

447 Универсальный материал (Mo-Ni-Composite-Pulver)

Средняя твёрдость вязкие слои с ударной вязкостью, износостойкий, стойкий к эрозии частицами и трению, а также к задирам с твёрдыми и мягкими поверхностями деталей. Очень высокая адгезионная прочность.

13% хромистая сталь

Трудноокисляемая твёрдая сталь с превосходными антифрикционными свойствами, низкий коэффициент усадки, поэтому пригодна для толстых слоёв, например, для ремонта поворотнолопастных турбин гидроэлектростанций. Используется для цилиндров, валов вентиляторов, плунжеров, цапф коленвалов, водяных затворов, навивочных оправок, барабанов волоочных станков, прессовых насадок, рольгангов и т.д. Используется при высокой нагрузке, обладая твёрдостью 49-52 HRC и высокой прочностью сцепления 30-40 кр/см². Рекомендуется шлифовать.

17% хромистая сталь

Нержавеющая сталь легированная 0,4% углерода и 1,85% Мо. Покрытие вязко-твёрдое, магнитное. Используется для износостойких слоёв при высоких нагрузках. Обычная твёрдость 40-42 HRC. Рекомендуется шлифовать.

Углеродистая сталь 100 (0,9 C – 99,1 Fe)

Сталь с высоким содержанием углерода с отличной износостойкостью. Твёрдость 55 HRC, обрабатывается шлифованием.

Алюминий – железо – бронза (Al Bz 8 Fe)

При напылении этот материал получает высокую твёрдость и износостойкость. Хорошо обрабатывается. Особенно применим для высоконагруженных подшипников, букс, фрикционных поверхностей, станин, вилок переключения, гидropоршней и т.д. Пригоден для псевдолегирования с углеродистыми и хромистыми сталями.

Молибден (Mo) 99,9%

Благодаря своим выдающимся металлургическим свойствам молибден обладает хорошей способностью к сцеплению (адгезии). Очень тонкие мелкозернистые слои позволяют напылять толщину покрытия менее 0,05 мм. Можно шлифовать до нуля. Из-за микропористости покрытие имеет очень хорошие антифрикционные свойства, которые могут быть повышены в сочетании с графитом. Напыляемые частично привариваются к подложке, обеспечивая высокую адгезию, что идеально подходит для исправления брака, ремонта, снижения допусков. Не применяется для азотированных и хромированных поверхностей, для деталей из меди или медисодержащих (более 20%).

Нихром (Ni-Cr 80/20)

Специальное применение в качестве подслоя и кислородного барьера для окисной керамики в не содержащей серу атмосфере. Хорошо пригоден для защиты от окисления для деталей, работающих в перегретом паре. Сопротивление к окислению при температурах до 1200 C0. Также наносится на детали, которые непосредственно после нанесения покрытия должны быть хорошо обработаны механически, например, футеровочные работы. Хорошая стойкость к истиранию. Высокое качество поверхности.

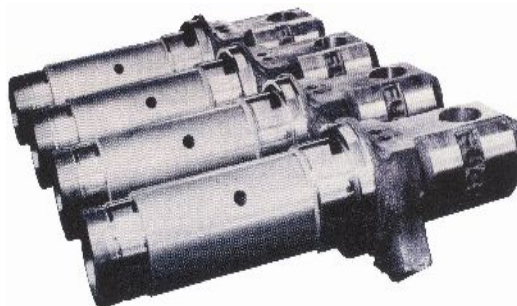
Хромо-никелевая сталь (1.4571)

Катодный немагнитный защитный слой для паровых и сушильноокрасильных вальцов, Вальцов для отверждения в производстве резины, сушильных цилиндров бумажных машин, для облицовки ванн и ёмкостей, трубные доски теплообменников. В соединении с пластмассой получается твёрдый износостойкий с хорошей эластичностью слой, противостоящий коррозии и истиранию (R-H-K – технологии).

Никель-алюминий (Ni – Al 95/5)

Отличный подслой с высокой адгезией (65 – 75 кр/см²). Частичная свариваемость с подложкой благодаря экзотермической реакции. Пластичный промежуточный слой. Может работать при высоких температурах.

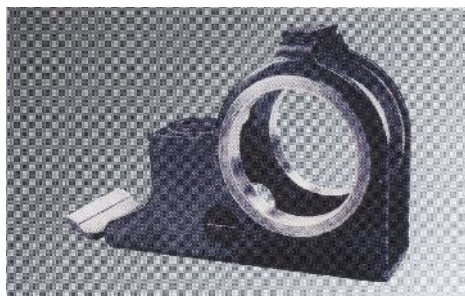
Поршни гидравлики
Покрытие из 17% хромистой стали в блоке
управления экскаваторного грейфера



Якорь электродвигателя. Ремонт
посадочного места под подшипник,
покрытие 13% хромистой сталью



Грейфер печатной машины, покрытие
поверхности подшипника 445 – ой
алюминиевой бронзой, керметное
покрытие на базе карбида вольфрама на
захватной части



Технология напыления с оплавлением

Материалы

Речь идёт о высококачественных металлических материалах в форме самофлюсующихся порошков, разделённых на две большие группы:

- порошок на основе никеля, никель-хром-бор-кремний;
- порошок на основе кобальта, хром-вольфрам-кобальт-сплавы.

Свойства

Все сплавы дают очень твёрдые и беспористые слои с гладкой и ровной поверхностью.

Наплавленные слои могут выдерживать практически все нагрузки, которые допускает основной материал. При температуре около 1100°C в пластичном состоянии возникает диффузионное соединение с основным материалом (подложкой), который может быть легированной или нелегированной сталью. При выборе материала подложки следует использовать материалы, не склонных к образованию трещин (высокое содержание хрома и углерода) и при оплавлении не подвергающихся закалке или росту зерна.

Назначение покрытий

- высокая ударная и износостойкость;
- хорошие антифрикционные свойства, низкий коэффициент трения при тяжёлых условиях эксплуатации и при плохой смазке;
- высокая поверхностная твёрдость из-за боридов хрома;
- стойкость при повышенных температурах до 600°C. Покрытие немагнитное;
- отличная коррозионная и окислительная стойкость, особенно в серосодержащих средах и серной кислоте.

Примеры применения

Нефтяная и химическая промышленность, целлюлозно-бумажные фабрики, производители насосов и компрессоров.

Поршневой шток, поршни насосов и валы. Плунжер, гильзы, ротор. Изнашивающиеся щёки, скользящий шиббер, клапан и седло клапана. Изнашивающиеся кольца, вращающийся шиббер, задвижка и т.д.

Стекольная промышленность

Пуансон, форма, плунжер, нож, направляющая штанга, кольца и т.д.

Станкостроительная и транспортная промышленность

Валы водяного насоса, стержень клапана, шаровой шарнир, подшипник скольжения, защитный цилиндр, шаблоны, экструдеры, шнеки, кулачки, радиальные вентиляторы, контрольные оправки, задвижки, центры токарных станков, шкворень и т.д.

Техника дробления

Ёмкость для измельчения, молот для дробления, перфорированный стальной лист для сит, мешалка, прокатные вальцы.

Керамическая промышленность

Кольцевое сопло, сердечник мундштука

Металлургическое производство

Рольганг, охлаждающие ролики, измерительные ролики, накатные ролики, поворотные ролики, ведущие ролики, направляющие планки, скользуны и т.д.

Производство арматуры

Шибберные задвижки, стержни шиббера, посадочное кольцо, шток клапана, посадочные места.

Примеры некоторых материалов

15E Хромоникелевый сплав

Отличная стойкость к износу и коррозии, хорошая ударная и термостойкость. Требует небольшую мехобработку, так как гладкий слой. Низкий коэффициент трения. 62 HRC.

(Ni 70,5 – Cr 17,0 – В 3,5 – Si 4,0 – Fe 4,0 – С 1,0)

18С Сплав кобальт-никель-хром

Высокая коррозионная и износостойкость. Отличная защита от износа при термических нагрузках. Например, гидро-газообразивная защита. Химическая стойкость. 50 HRC.

(Ni 26,8 – Cr 18,0 – В 3,0 – Si 3,5 – Fe 2,5 – С 0,2 – Со 40,0 – Мо 6,0)

34F Композит карбид вольфрама и кобальта (плакированный) 50/12%

Хромо-никелевая матрица. Мелкое зерно, высокая износостойкость, покрытие с низкой шероховатостью. Твёрдость матрицы 60 HRC, карбидных частиц 72 HRC.

36С Композит карбид вольфрама и никеля (плакированный) 35/8 %

Смесь больших частиц карбида вольфрама с самофлюсующимся хромоникелевым сплавом.

Повышенная стойкость к износу. Матрица 60 HRC, карбидные частицы 75 HRC.

Рабочее колесо насоса, напыление с
оплавлением порошком 15 Е



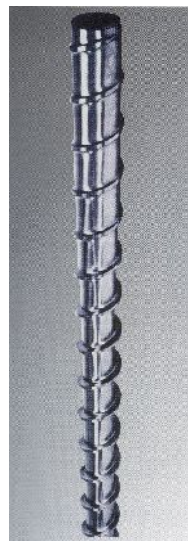
Ротор насоса, изготовлен без
последующей механической обработки.
Напыление порошком 15 Е с
последующим оплавлением.



Цилиндры бумажной
машины с покрытием
из порошка 15 Е.
Основной материал
1.4571



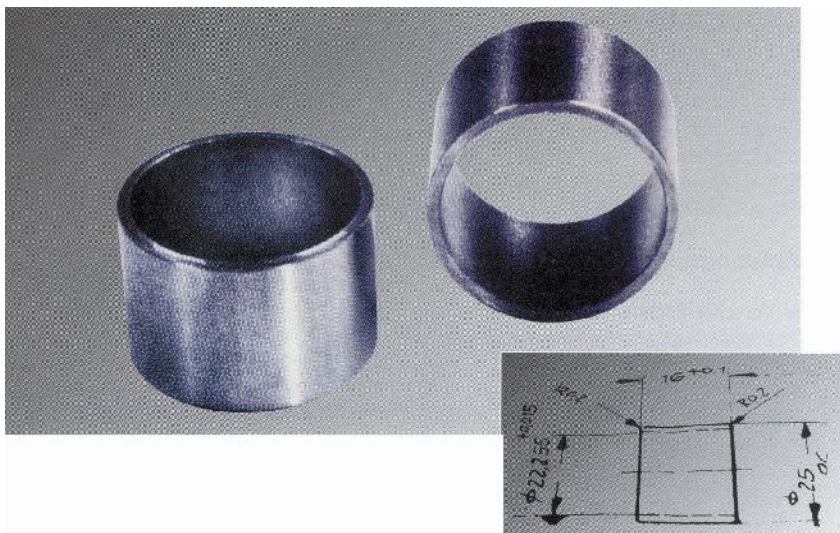
Экструдер шнека. Покрытие порошком 19E



Уплотнительный затвор управляемого клапана очистной станции. Порошок 15E.



Центрирующие цилиндры токарного станка. Порошок 34F.



Керамические покрытия

Назначение

Эти покрытия увеличивают срок службы деталей машин и приборов, уменьшают расходы на материалы и обработку, создают защиту от коррозии, эрозии, износа, высоких температур, обеспечивают электрическую изоляцию. Покрытия из окисной керамики наносятся на многие материалы и имеют следующие свойства:

- высокая температура плавления;
- большая твердость;
- инертны к химическому влиянию;
- хорошая прочность сцепления и эластичность;
- низкие коэффициенты термического расширения.

Свойства покрытий

Для нанесения покрытий наиболее часто используют окись алюминия и окись циркония. Покрытия из окисной керамики наносят толщиной 0,1 – 1,0 мм и более, в необработанном состоянии имеют шероховатость 15 – 30 мкм. Лучшее качество поверхности может быть достигнуто шлифованием, хонингованием и доводкой алмазным инструментом. Для уплотнений шероховатость достигает максимум 2 – 4 мкм.

Примеры применений

А) Защита от износа

Для создания износостойких покрытий используют окись хрома. Окись хрома обладает большой стойкостью к истиранию, шлифованием достигается очень высокое качество поверхности. Типовые области применения:

- насосы: валы, корпус крыльчатки;
- кулачковый привод: кулачок, эксцентрик, токатель;
- станки: все уплотняющие поверхности;
- текстильные машины: направляющие нитей;
- бумажные машины: покрытие сифонного ящика, шаблон сеточного стола;
- печатные машины: основание шрифта (талер);
- опорные места, особенно для подшипников со смазкой не маслом;
- калибры, шаблоны, седло клапана, вальцы, транспортные ролики, шпидли, цанги.

В) Тепловая изоляция и одновременно защита от истирания и, или коррозии. Пригодными для этого материалами являются окись алюминия и окись циркония, последний из них наиболее пригоден в особо тяжёлых условиях эксплуатации благодаря своей низкой теплопроводности и высокой температуре плавления.

Типовые области применения:

- ракеты: двигатель, сопло, головная часть;
- самолёты: мотор, турбина, сопло;
- дизельные двигатели: сопло впрыска, смесительная камера;
- обработка стали: вальцы, транспортные ролики;
- литьё под давлением: формы, штампы, тигли, насосы;
- применение при высоких температурах: валы, корпуса, крыльчатка, термоэлементы;

С) Электрическая изоляция в сочетании с термоизоляцией и, или защитой от истирания и, или коррозии. В основном все окисные материалы применяются для электрической изоляции. При высоких температурах применение окиси алюминия предпочтительно, так как уменьшение сопротивления окиси алюминия при повышении температуры незначительно.

Типовые области применения:

- элементы прерывания тока;
- индукционные катушки для печей и закалочных устройств;
- термоэлементы.

Д) Примеры для других применений для покрытий из окисной керамики:

- упаковочные машины: защита от прилипания пластмассы, защита металла при высоком давлении пара;
- измерительная техника.

Материалы подложки

В качестве подложки могут применяться в основном все материалы, которые имеют прочную форму, позволяют создавать шероховатость и не оплаиваются от нагрева напыляющей струей, не науглераживаются или не окисляются. Примеры материалов, покрываемых окисной керамикой: чугун, сталь, сплавы никеля, медь, латунь, алюминий, цинк, свинец, магний, молибден, титан, графит, керамические изделия, стекло, асбест, стекловолокно, прессованная пластмасса, платина.

Подающая цанга. Покрытие окисью хрома от холодной сварки

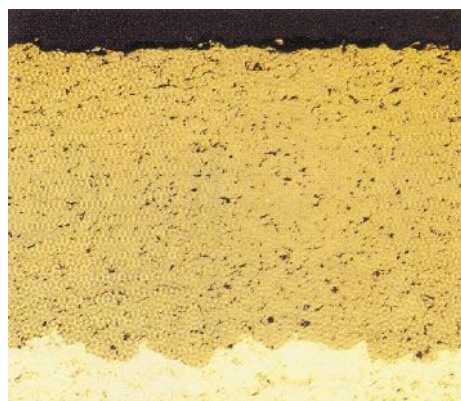


Кольцо износа. Покрытие окисью хрома с пропиткой наружной поверхности графитом для многократного уплотнения экструдерной системы.



Шпиндель привода. Молибденовое покрытие для подшипника скольжения. Покрытие из окиси хрома для уплотнений.

Покрытие из окиси хрома (Cr_2O_3)
200 кратное увеличение



Технические данные

	Оксид алюминия	Оксид циркония	Силикат циркония	Оксид хрома	Нихром
Химический состав	98,6 % Al_2O_3	98% стаб. ZrO_2	65% ZrO_2 34% SiO_2	90% Cr_2O_3	80/20 Ni Cr
Стойкость к щелочам и кислотам	хорошая, кроме горячих щелочей	хорошая, кроме горячих кислот	хорошая	хорошая, кроме горячих кислот	
Форма кристалла	Гамма	кубическая	Кубическая у окиси циркония	гексагональная	
Объёмный удельный вес г/см ³	3,3	5,2	3,8	4,6	8
Пористость	8 -12 (7% открытая)	8 – 12 (7% открытая)	8 -12 (4% открытая)	4 (2% открытая)	0
Твёрдость монолитного кристалла (по Mohs)	9,5	9,5	9,5	9,5	3
Предел прочности кг/см ²	2600	1470	-	7380	4920-7300
Адгезия на стали Н/мм ²	40 - 70	40 - 70	40 - 70	70	-
Износостойкость	Очень хорошая	хорошая	хорошая	Очень хорошая	-
Коэффициент трения по стали, схожей со сталью 4124	0,1	0,1	0,1	-	
Удлинение (% от длины) при толщине слоя 0,5 мм	0,7	1,4	0,7	1,3	0,2
Структура поверхности (Глубина шероховатости в мкм) - необработанная - шлифованная - притёртая	около 20-30 3-5 около 2,5	около 20-30 3-5 около 2,5	около 20-30 3-5 около 2,5	около 20-30 1,5-2,5 1,0 - 2,0	
Температура плавления °C	1980	2480	1650	1650	1450
Соппротивление термошоку	хорошее	очень хорошее	хорошее	посредственно	-
Средняя величина теплопроводности 540-1090 °C kcal/ h·m· °C	2, 36	0, 99	1, 86	2, 23	12, 6
Средняя величина теплоёмкости kcal/ kg· °C	0,28 (30° – 1700 °C)	0,18 (30° – 1400°C)	0,15	0,2 (16° -1480°C)	0,12 (1° – 100°C)
Коэффициент линейного теплового удлинения мм/мм× °C	$7,38 \times 10^{-6}$ 20° – 1230°C	$9,72 \times 10^{-6}$ 20° – 1230°C	$7,56 \times 10^{-6}$ 20° – 600°C	$9,00 \times 10^{-6}$ 20° – 1100°C	$18,9 \times 10^{-6}$ $-20,7 \times 10^{-6}$ 1° – 980°C
Коэффициент эмиссии при толщине слоя 0,762 мм	При 1000°C=0,4	При 1000°C=0,34	При 60°C=0,78	При 1000°C=0,75	При температуре вальцовки = 0,45
Электропроводность	изолятор	Изолятор, но при температурах более 1200 °C проводник	изолятор	изолятор	проводник
Электросопротивление, Ом	$4,5 \times 10^6$ при 260°C $4,5 \times 10^5$ при 450°C	$2,7 \times 10^4$ при 260°C $2,1 \times 10^2$ при 450°C	$1,1 \times 10^6$ при 260°C $4,0 \times 10^2$ при 450°C	- -	$28,3 \times 10^{-6}$ при 20°C $45,6 \times 10^{-6}$ при 650°C
Пробойное напряжение (переменный ток: V/0,25mm толщины слоя при увеличении напряжения 200 V/сек). При испытании толщина слоя была 0,25-1,25 мм.	Около 90-180 V	-	-	Около 0,01-85 V	-
Диэлектрическая постоянная (0 – 320°C)	10	35	15	-	-
Коэффициент диэлектрических потерь	0,5	5,25	1,2	-	-
Коэффициент утечки (0°-320°C)	0,05	0,15	0,08	-	-
Краска	белая	светлобежевая	светлобежевая	черная	
Рекомендуемая толщина покрытия	0,12 – 1,3 мм	0,12 – 1,3 мм	0,12 – 1,3 мм	0,12 – 1,3 мм	0,05 – 0,10

Газопламенное нанесение покрытий из твердых сплавов

Особенности сверхзвукового газопламенного напыления.

Экстремально высокая скорость и соответственно высокая кинетическая энергия приводят к следующим результатам:

- высокая адгезия к подложке;
- высокая когезионная прочность;
- минимальная пористость.

При сверхзвуковом напылении скорости газа достигают величин более, чем 2100 м/сек. При распылении карбидов скорость частиц более, чем 800 м/сек. (при этом мощность современных вновь разрабатываемого оборудования растёт).

Преимущества

- длительное время пребывания напыляемых частиц в пламени и благодаря этому задящее равномерное проплавление;
- сильно концентрированный поток напыления с возможностью регулировки нейтральной, окислительной или восстановительной среды;
- отсутствие повреждений напыляемого материала высокими температурами (перегрев), без фазовых превращений;
- мелкие частицы порошка не выгорают;
- распыляемый материал не вступает в химическую реакцию с газом пламени и окружающей атмосферой;
- очень высокая скорость напыляемого порошка (400 – 800 м/сек);
- экстремально высокое сцепление;
- минимальная пористость (менее 0,5%);
- не требуется последующая термообработка;
- очень твёрдые (71 HRC – 1350 HV0,3);
- поверхности покрытия с низкой шероховатостью (N8/N7);
- при алмазной шлифовке можно достичь шероховатость поверхности менее 1 мкм Rt;
- все свойства порошка остаются полностью сохранёнными с гомогенным распределением карбидов;
- низкая температура покрываемых деталей, максимально 150 0C. Отсутствие короблений и изменений структуры;
- целесообразная толщина покрытия 0,1 – 0,3 мм;
- для деталей с высокой нагрузкой на плоскость твёрдость поверхности может быть максимум 58 HRC и твёрдость сохраняется после нанесения покрытия.

Краткая характеристика напыляемых материалов

WC-Co 88-12 карбид вольфрама с кобальтом

При размерах напыляемых частиц 1-2 мкм достигается высокая несущая способность шлифованной поверхности. Плотные и экстремально твёрдые износостойкие защитные покрытия с высокой адгезией до температур 400 0 C. Хорошая износостойкость, прочность на сжатие и термоцикlostойкость. Может служить контртелом для металлокерамики в подшипнике скольжения при твёрдости около 71 HRC.

WC-Co 83-17 карбид вольфрама с кобальтом

Износостойкий вязкий слой стойкий против абразии, кавитации, износа при скольжении и высоких механических нагрузках. Тонкая структура поверхности и высокая стойкость к задирам, в отличии от покрытий с 12% кобальта. Позволяет наносить большие толщины. Максимальная температура эксплуатации около 500 0 C.

WC-Co-Cr 86-10-4 карбид вольфрама с кобальтом и хромом

Стойкий против эрозии и абразии. Рекомендуются для водных растворов. Co-Cr матрица даёт высокую стойкость к абразии и коррозии, в сравнении с WC-Co- материалами. Используется для защиты от износа на вальцах в бумажной промышленности, там, где сыро и коррозия. Сопротивление окислению до 650 0C.

Cr₃C₂ Ni-Cr 75-25 карбид хрома с карбидом никеля

Абразивно-износостойкий слой для температур до 9000C. Твёрдость соответствует WC-Ni. Самое лучшее покрытие от абразивной эрозии и горячей газовой коррозии. Стойкий к сере и окислам серы (SO₂). Низкое трение. Имеет допуск использования в атомных реакторах. Заменяет WC-Ni 88-12.

Сплав Хастеллой В (Ni-Cr-Mo).

Высокая коррозионное и окислительное сопротивление до 8700C. Высокая сцепляющая способность. Стойкий к морской воде и к многим кислотам и щелочам, солевым растворам. Хорошо обрабатывается механически на токарных и фрезерных станках.

WC-CrC-Ni 73-20-7 (LW5)

Хорошая износостойкость в щелочах и органических кислотах при высокой температуре. Хорошие антифрикционные свойства, не содержит кобальта, используется в ядерной промышленности.

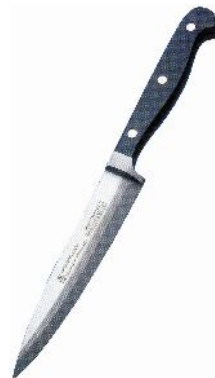
Молибден (Mo)

Высокие износостойкость и адгезия, низкий коэффициент трения.

Сплав Хастеллой С (Ni-Cr-Mo)

Хорошая износостойкость и очень хорошая коррозионная стойкость. Механически обрабатывается только шлифовкой.

Домашний нож. Лезвие покрыто WC-Co-Cr



WC-Co 88-12 (200-х кратное увеличение)



WC-Co 83-17 (200-х кратное увеличение)



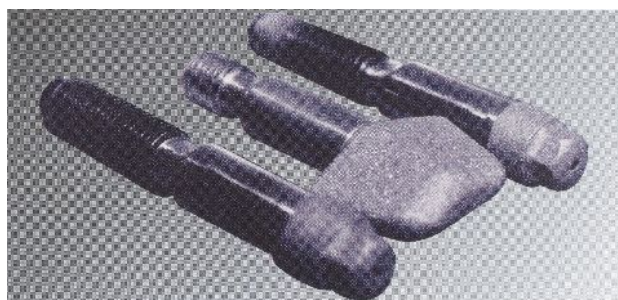
Температурные датчики.
Измерительный конус покрыт WC-Ni
88-12



Кольцо подшипника скольжения.
Покрытие WC-Co 88/12. Типичное
применение при одновременном
воздействии коррозии и абразии.
Толщина покрытия 200 мкм после
финишной мехобработки.



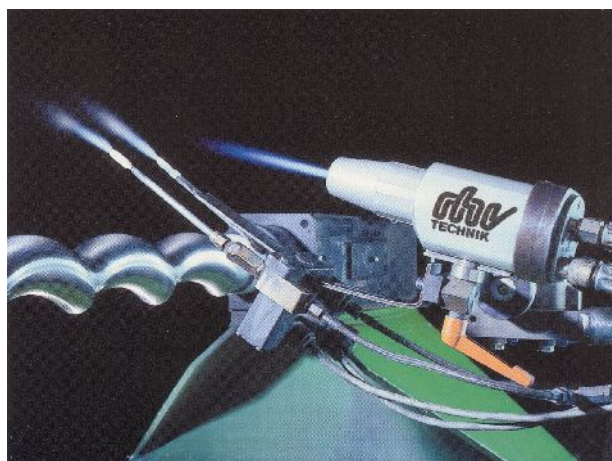
Месильные лопасти. Защитное покрытие
от износа карбид хрома-никель-хром
75/25



Измерительная головка с покрытием из
WC-Co 88/12



При сверхзвуковом газопламенном
напылении хорошо видны типичные
скачки уплотнения. Охлаждение деталей
CO₂.



Коррозионностойкие покрытия

Общие положения

Металлы под влиянием окружающей среды (воздуха, воды) стремятся перейти в окислы, или в присутствии солей, щелочей, кислот – в солевые соединения. Этот процесс разрушения наружной поверхности металлического тела имеет химическую или электрохимическую природу и называется коррозией или разложением. Кавитация и эрозия, возникающие из-за турбулентности и высокой скорости потока, а также динамические воздействия от конденсации и испарения, обычно совмещаются с коррозионным влиянием на материал. Следовательно, решающим для стойкости металла являются его механические и поверхностные свойства. Стойкость поверхности может определяться высококачественными защитными покрытиями.

Способы

Высококачественные коррозионностойкие покрытия можно получить использованием различных газотермических технологий, распылением порошковых, проволоочных, стержневых или шнуровых материалов: газопламенное напыление, электродуговая металлизация, плазменное напыление, сверхзвуковое напыления, динамическое холодное напыление. Используя эти технологии можно получить покрытия различной толщины и структуры, воздать надёжную защиту от коррозии, кавитации, эрозии.

Преимущества

- деталь нагревается незначительно, не происходят изменения структуры, коробление, удлинение;
- применение способов не сильно зависит от размеров и конструкции деталей, возможно нанесение покрытия на локальные поверхности;
- при нанесении образуются мелкозернистые и микропористые равномерные покрытия, которые служат хорошим подслоем для всех видов покраски;
- напылением может быть создана равномерная толщина, при необходимости от десятых долей до нескольких миллиметров, из одного или нескольких материалов (в том числе, из псевдосплавов);
- технология позволяет использовать дорогостоящие материалы на ограниченных поверхностях в целях их экономии, а основную массу детали сделать из экономичных конструкционных материалов. Все нежелательные поры на покрытиях могут быть заделаны.

Коррозионная защита при нормальных температурах

Для металлов, работающих при нормальных температурах, покрытия наносят из цинка, алюминия и их сплавов. Основное применение такие металлоконструкции имеют в мостостроении, высотных и подземных конструкциях, гидротехнических сооружениях при воздействии материковой и морской атмосферы (в том числе, в тропиках). Покрытия имеют толщину 80 – 140 мкм. Толщина 200 мкм используется при необходимости обеспечить очень длительную стойкость в морской атмосфере. В комбинации с последующим нанесением лакокрасочного покрытия гарантируются отличные результаты. Краска должна быть по возможности как можно быстрее нанесена на газотермическое покрытие, заполнить поры, герметизировать и быть прочной. Краска должна быть совместима с газотермическим покрытием и перекрывать поверхностную шероховатость покрытия.

Коррозионная защита при высоких температурах

Для деталей, работающих при высоких температурах, производится защита металла (основного конструкционного материала) как металлическими покрытиями, так и окислами. При этом, в зависимости от температуры, может происходить процесс насыщения поверхности покрываемой детали материалом покрытия, как при алитировании. Иногда используют термин для таких процесс «алитирование напылением».

А) Алитирование напылением.

Этот процесс применяют там, где детали из стали необходимо защитить от образования окалины при высоких температурах эксплуатации, а изготовление деталей из жаропрочных сталей экономически не выгодно. Процесс алитирования основан на том, что при 8000С алюминий диффундирует в сталь и образуется сплав железо-алюминий. Таким образом, между алюминиевым покрытием на поверхности и сталью основы образуется промежуточный переходной слой. Этот слой и несёт основные защитные свойства. На поверхности образуется прочная жаростойкая плёнка из окиси алюминия, препятствующая проникновению кислорода в сталь.

Б) Коррозионная защита при высоких температурах окислами металла.

При температурах более 10000С алитирование не обеспечивает длительную эксплуатацию. Здесь следует использовать оксидные материалы. В основном используются окись алюминия, окись циркония и силикат циркония. Температура плавления окиси циркония 24800С. Силикат циркония имеет аналогичные свойства коррозионной защиты при высоких температурах, а также особенное сопротивление действию кислот и щелочей. Кроме всего прочего, защитные слои из керамики прекрасно защищают от кавитации и эрозии в сочетании с высокими электроизоляционными свойствами.

Коррозионно- и эрозионностойкие комбинированные покрытия (кратко R-H-K)

Если на деталь воздействуют одновременно коррозия и знакопеременные нагрузки, то прочность цинка и алюминия сильно уменьшаются. В этом случае часто выбирают для покрытия легированные металлы такие, как 13-17% хромистая сталь или нихром, и пропитывают эти покрытия двух компонентными эпоксидными составами с низкой вязкостью. Эпоксидка должна гарантированно проникнуть в поры и капилляры покрытия, полностью их заполнить, и тем самым также укрепить металлическое покрытие. Затем на поверхность покрытия наносится толщиной 100-200 мкм двух компонентный эпоксидный состав с необходимым цветом для выравнивания шероховатости металлического слоя и дополнительной защиты от химического и механического воздействия.

Комбинированные покрытия обычно имеют толщину 250-350 мкм и вес 1,5-2 кг/м². При необходимости они могут быть тоньше или толще. Образование под такими покрытиями коррозии или бактерий невозможно. После твердения эпоксидки эти покрытия становятся биологически чистыми. Введение в эпоксидку различных неметаллических наполнителей, например, таких как базальт, карбид кремния, корунд, существенно улучшает механические износостойкие свойства.

Комбинированные покрытия имеют хорошую стойкость к растворённым неорганическим кислотам, щелочам и минеральным маслам, растворам солей, морской воде, сточным водам, моющим средствам на основе, жирам, бензину и т.д., при температуре до 1800С. Также хорошая морозостойкость и стойкость при запотевании.

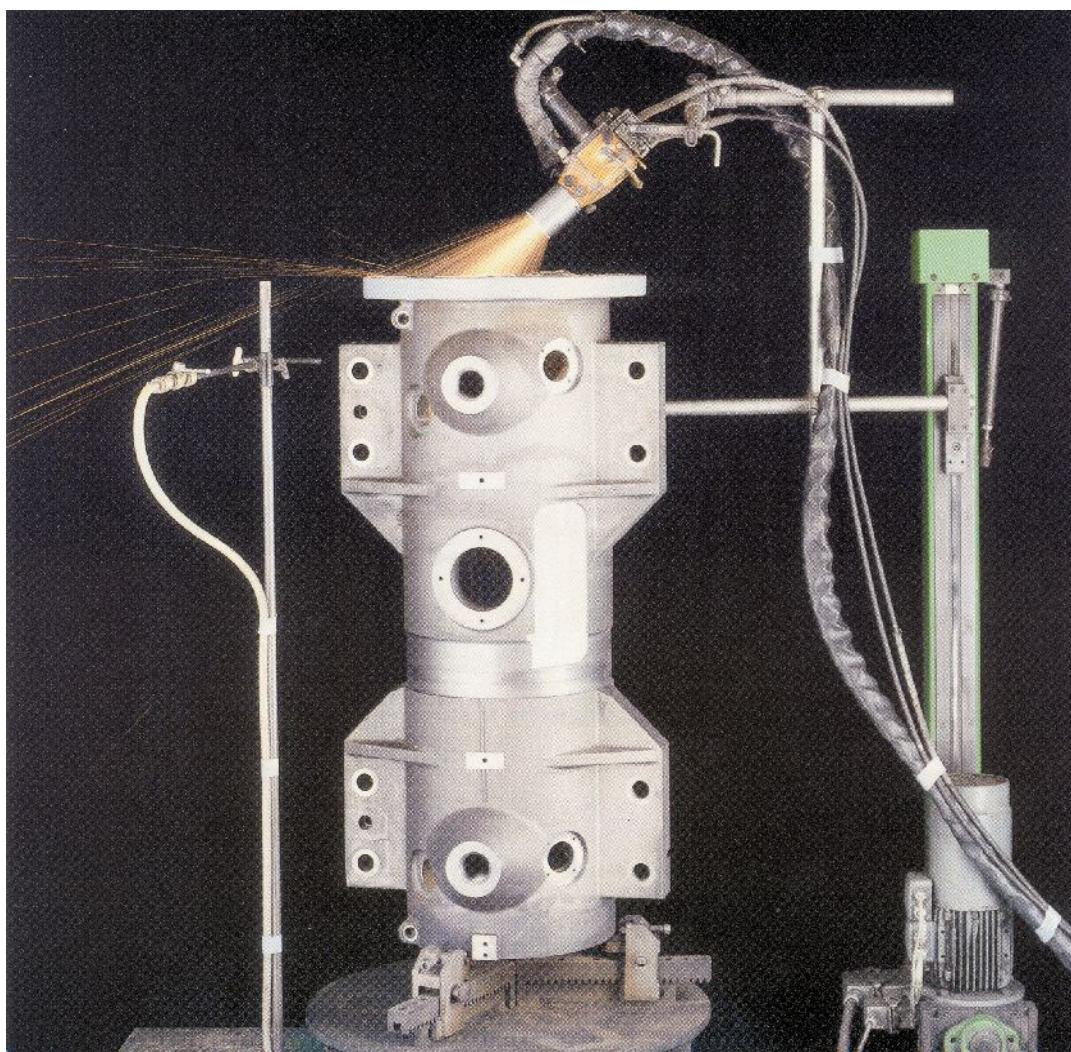
Как химически высокостойкое покрытие эффективно применяется в химической промышленности, для очистных сооружений, на атомных электростанциях, и бумажной и сахарной промышленности, для защиты различных металлоконструкций в агрессивной промышленной атмосфере.

Покрытие наружной поверхности
спутниковой части ракетносителя окись
циркония/окись кальция 97/3, толщина
покрытия около 1,0 мм



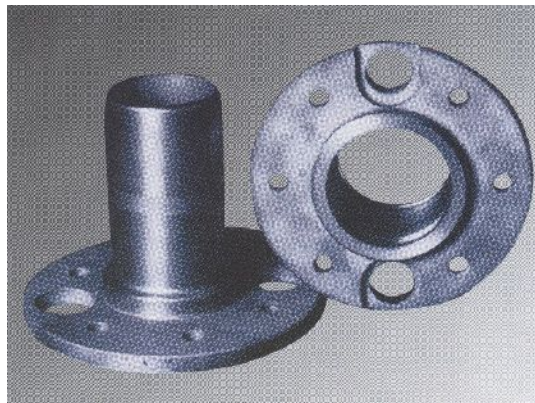
Некоторые примеры применения покрытий

Защитная втулка вала для химической промышленности. От воздействия кислот – окись алюминия, от воздействия щелочей – окись хрома



Гидроцилиндр. Покрытие алюминий-железо-бронза наносится электродуговой металлизацией.

Фланец подшипника – покрытие 13% хромистая сталь.
Подшипниковая втулка – алюминиевая бронза (Al Vz-8 Fe).
Эта пара деталей используется для сельхозмашин.



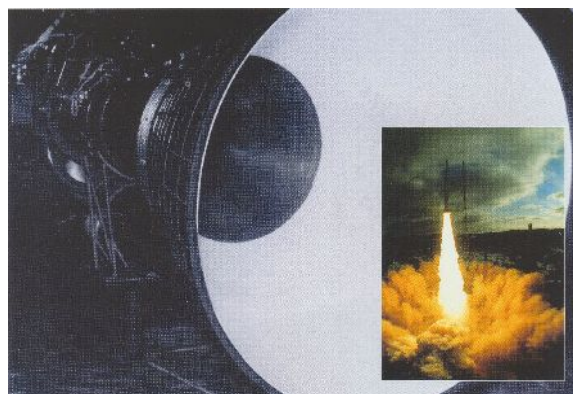
Волоочильный барабан проволоки с керамическим покрытием (Al_2O_3 или Cr_2O_3). Шлифованная или полированная поверхность имеет очень низкий коэффициент скольжения. Чрезвычайно высокая твердость покрытия гарантирует длительный срок службы.



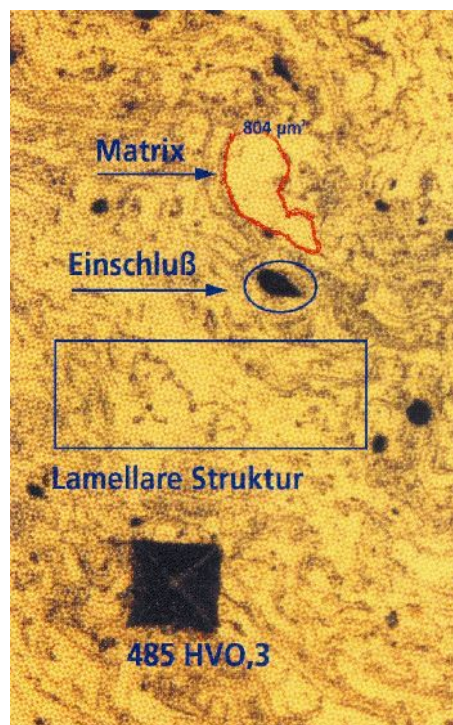
Приводной вал насоса, в местах уплотнений покрыты сталью 1.4571 и окисью хрома. Шлифован.



Сопло ракетного двигателя. Высокотемпературная защита из окиси циркония/окиси иттрия. Нанесено газопламенным распылением керамических стержней.



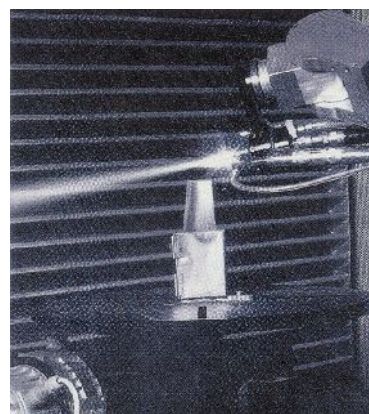
Металлографический шлиф хромового покрытия. Увеличение 200.



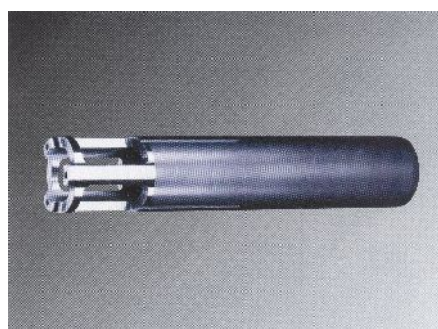
Механическая обработка напыленной детали



Напыление лопаток турбин на роботизированной плазменной установке



Дозирующий поршень в пищевой промышленности



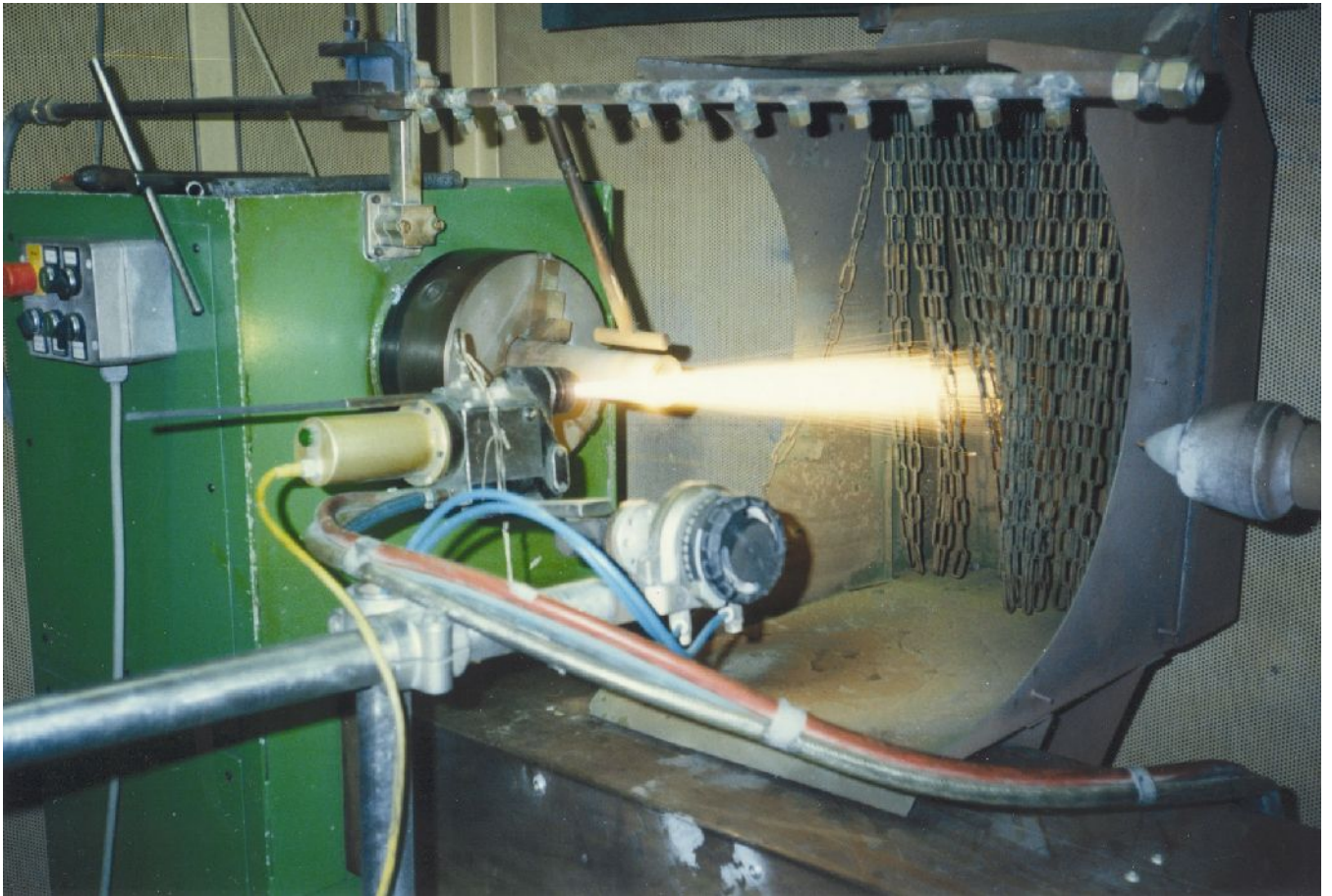
Распределительная втулка для
индустрии напитков. WC-CrC-Ni
73-20-7 (LW5) – покрытие в зоне
уплотнений.



Абразивный и коррозионный износ
детали из легированной стали.
Нанесение защитного покрытия
толщиной около 400 мкм карбид
вольфрама-кобальт-хром 86-10-4



Покрывание лопатки турбины WC-Co 83-17



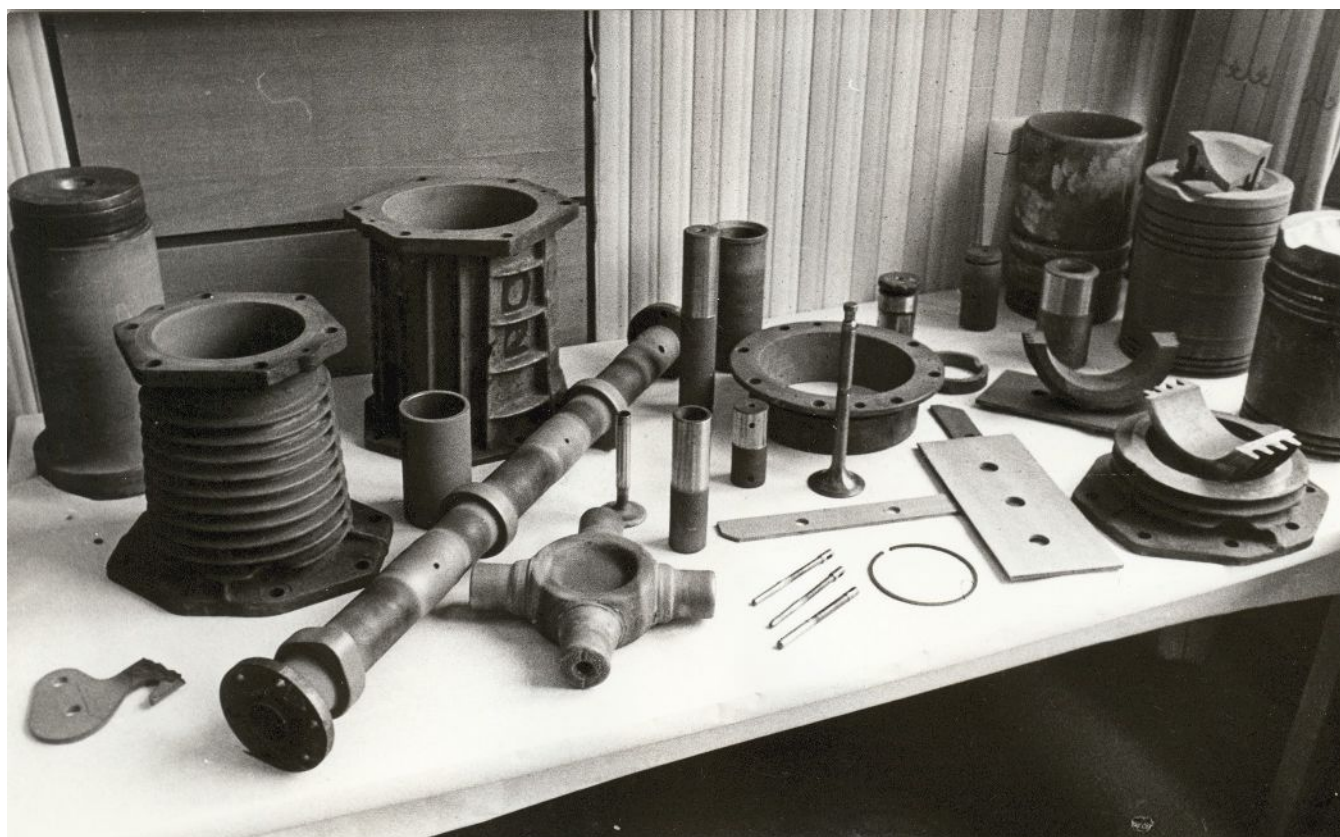
Газопламенное распыление стержней



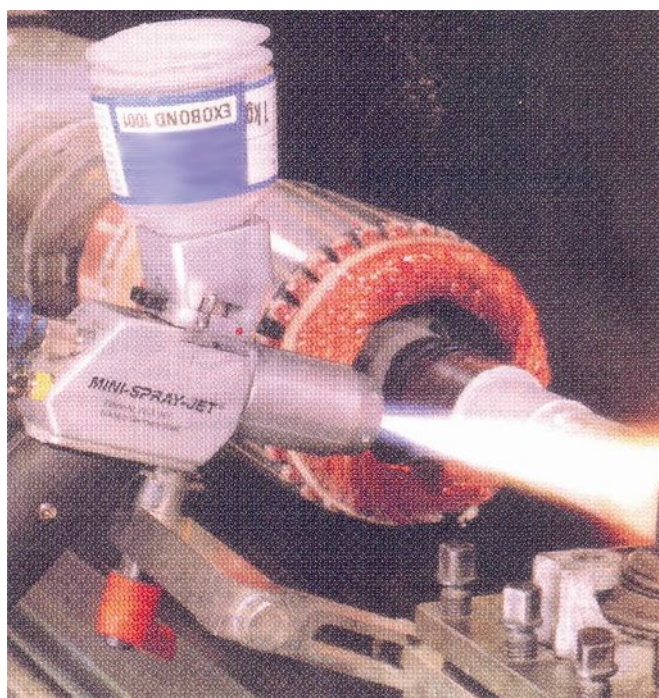
Металлизация цинком моста через р. Амур



Оцинкованные перила



Детали железнодорожного транспорта



Газопламенные комплекты для нанесения покрытий из порошковых материалов.



Ввод в эксплуатацию комплекса оборудования для струйно-абразивной беспылевой подготовки поверхности и электродуговой металлизации (ЭДМ) для антикоррозионных и износостойких покрытий на трубы нефтедобывающей промышленности, г. Москва.



Детали железнодорожного транспорта

Примечания о покрытиях

Сцепление

Между металлическими и керамическими покрытиями и подложкой не образуется соединения расплавленных материалов. Поэтому требуется подготовка поверхности подложки созданием шероховатости с помощью сухой и острогранной дробью. Сцепление напыляемых частиц осуществляется благодаря адгезии, когезии, частичной точечной сварке, механическому зацеплению и усадочным напряжениям. Они основаны на физико-механических силах.

Структура покрытия – ламелли (пластинчатость) – пористость

Напылённые покрытия образуются при ударе расплавленных частиц, образовании и затвердевании ламелл параллельно подложке. Ламелли имеют толщину несколько сотых миллиметра и придают покрытиям анизотропные свойства. Между ламелями имеются маленькие поры и окислы. Такая гетерогенная структура имеет меньшую прочность, чем исходный материал. С другой стороны слоистая структура имеет преимущества при трении скольжения и термоударах.

Высокая проникаемость покрытий может оказаться недостатком в коррозионной среде, что приведёт к коррозии под покрытием. Но можно провести уплотнение (закрытие) пор последующим импрегнированием покрытия различными методами, например, искусственными смолами и т.д. Для выбора уплотнителя решающим являются условия эксплуатации деталей. Применением смазывающих уплотнителей можно улучшить свойства скольжения напылённой поверхности или наоборот уменьшить. Положительное влияние пористости проявляется в парах трения для сохранения смазки. Это приведёт к относительно лучшей смачиваемости, улучшению гидродинамического эффекта при ударных нагрузках и существенному улучшению антизадирных свойств. При местном нагреве смазка может расширяться и выходить из пор на поверхность трения. В некоторых случаях из-за пористости важным является повышенная вязкость покрытия, а также высокая стойкость к термоударам вследствие внутренней компенсации температурных удлинений.

Наконец, из-за пористости понижается модуль упругости, что для многих случаев применения, главным образом, для демпфирующего эффекта, может быть полезным.

Твёрдость поверхности

Определение твёрдости напылённых слоёв вследствие гетерогенной структуры в большинстве случаев вызывает проблемы. Из-за относительно малой толщины покрытия отпадают измерительные методы с большими нагрузками, показывающие хорошие средние значения. Способы измерения при малых нагрузках зависят от случайного положения измерительного отпечатка, что может привести к определению очень малой величины из-за попадания в скрытую пору. Для композиционных материалов наоборот может быть получена экстремально большая величина при попадании на твёрдую частицу, находящуюся в мягкой матрице. Поэтому в большинстве случаев используют измерение микротвёрдости с лучшим определением отпечатка, или используют методы царапания и риск, допускающих широкий разброс измеряемых величин. Нужно иметь в виду, что анизотропия, обусловленная слоистой структурой, имеет влияние на измерение твёрдости. В целом можно констатировать, что в силу особенностей покрытия твёрдость покрытий не определяет его износостойкость, как это проявляется у массивных (литых) материалов. Часто наблюдается, что напылённое покрытие с низкой твёрдостью превосходит массивный (литой) материал с высокой твёрдостью по износостойкости.

Толщина покрытий

Из техники покрытий известно, что склонность к образованию трещин сильно возрастает с ростом толщины слоя. Это относится и к напылённым покрытиям, поскольку, в сущности, напылённое покрытие имеет слоистую структуру с порами, состоящую из многих высокопластичных микропластин. Необходимо учитывать опасность образования трещин у толстых покрытий, которые часто делают из желания возможно большего запаса для износа или многократной механической обработки. Эта опасность, прежде всего, имеет место для твёрдых покрытий, например, при сильной разнице поведения при тепловом удлинении материалов покрытия и основы. Если всё же необходимо нанести толстое покрытие, то используют промежуточные слои, обеспечивающие сцепление и выравнивание напряжений.

Коррозионная стойкость

Коррозионностойкость напылённых покрытий в основном определяется следующими тремя факторами: Материал покрытия: возможно нанесение покрытий из многих коррозионностойких материалов. При этом надо иметь в виду, что при распылении происходит изменение сплава. Так, например, для нержавеющей и кислотостойких сталей может наступить обеднение хрома на краях микропластин, тогда после напыления эти материалы только условно могут служить защитой от коррозии и кислот. Если распыляют чистые элементы, например, никель или хром, изменений не наблюдается. Особенно коррозионностойкими являются керамические материалы.

Пористость: она пагубно сказывается на коррозионной стойкости покрытий. Рекомендуется поры уплотнять.

Подложка: из вышеизложенного следует, что при неуплотнённых порах материал подложки должен быть коррозионностойким. Лучшим сочетанием является коррозионностойкая сталь и керамическое покрытие.

Подложка – конструкционная прочность детали

Почти все металлические конструкционные материалы могут иметь покрытия. Благодаря этому имеется единственная в своём роде возможность использования лёгких деталей в машиностроении. Кроме того, могут иметь покрытия такие материалы, как бумага, картон, дерево, текстиль, керамика, гипс, бетон и др. Следует отметить, что как правило покрытия не увеличивают усталостную прочность покрытий. А наносить покрытия на закалённые или азотированные поверхности следует применяя специальные технологические приёмы.

Покрытия с оплавлением.

Покрытия со специальным составом, преимущественно на базе бора, после напыления посредством местного нагрева могут быть оплавлены и диффундировать с основным материалом. Эти покрытия абсолютно плотные, коррозионно- и износостойкие, что связано с выбором напыляемых компонентов. Недостатком напыления с оплавлением является нагрев основы (до 1050 – 11000С), что ограничивает прочность деталей.

Сверхзвуковое газопламенное напыление

Сверхзвуковые скорости напыляемых частиц позволяют создавать покрытия с чрезвычайно низкой пористостью, высокой прочностью и износостойкостью. Уже без последующей механической обработки можно получать достаточно гладкую поверхность.

Механическая обработка покрытий

Мехобработка покрытий: токарная, фрезерование, шлифовка, хонингование, полировка, суперфиниш и т.д.; имеют, в силу структуры и свойств покрытий, свою специфику, сильно отличающуюся от обычной обработки массивных (литых) материалов.

Что такое электродуговая металлизация?

Об электродуговой металлизации (ЭДМ) написано достаточно много. Эта технология известна с XX века. Одной из первых книг, написанных на эту тему, является "Das Schoopsche Metallspritzverfahren" Н.Gunter, M.Schoop, 1917.

Российские учёные и инженеры также внесли вклад в развитие технологии электродуговой металлизации (ЭДМ) "Основы металлизации распылением", А.Ф. Троицкий, 1960.

По классификации GTS (Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V) ЭДМ является одним из способов нанесения газотермических покрытий (ГТП).

Одной из книг, подробно описывающих газотермические технологии, является "Техника напыления" А. Хасуй, Пер. с японского. М., "Машиностроение", 1975. После подобных сборников не издавалось.

К числу публикаций можно отнести труды конференций по ГТП, которые регулярно проходят раз в два года International Thermal Spray Conference and Exposition (ITSC), а также коллоквиумы по сверхзвуковым ГТП (6. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) Conference Proceedings 27-28 November 2003, Erding). Но на русский язык они не переведены.

В книге А. Хасуй "Техника напыления" приводятся преимущества и недостатки технологии ГТП, а также описание технологии ЭДМ:

"Преимущества":

1 Напылением можно наносить различные покрытия на изделия из самых разнообразных материалов. Так, например, металлы можно наносить на стекло, фарфор, органические материалы (дерево, ткань, бумага) и т. д.

2. Равномерное покрытие можно напылить как на большую площадь, так и на ограниченные участки больших изделий, тогда как нанесение покрытий погружением в расплав, электролитическое осаждение, диффузионное насыщение и другие методы могут быть использованы в основном для деталей, размеры которых не превышают рабочих объемов используемых для этих целей ванн или нагревательных устройств. Напыление является наиболее удобным и высокоэкономичным методом в случаях, когда необходимо нанести покрытие на часть большого изделия.

3. Напыление и наплавка являются наиболее эффективными способами в случаях, когда необходимо значительно увеличить размеры детали (восстановление и ремонт изношенных деталей). Этими методами можно наносить слои толщиной в несколько миллиметров.
4. Оборудование, на котором производят напыление, является сравнительно простым и легким и его можно достаточно быстро перемещать. Для газопламенного напыления достаточно иметь компрессор, который можно также использовать для предварительной пескоструйной обработки поверхности основы, горелку для напыления и баллоны с газами. Если же имеется источник электроэнергии, то напыление можно производить электрическими методами.
5. Для напыления можно использовать различные металлы и сплавы, а также большое число соединений и их смеси. Можно напылять различные материалы в несколько слоев, что позволяет получать покрытия со специальными характеристиками.
6. Основа, на которую производится напыление, мало деформируется, тогда, как при других методах нанесения покрытий необходимо нагревать до высокой температуры всю деталь или большую ее часть, что часто приводит к ее деформации.
7. Напыление можно использовать для изготовления деталей различной формы. В этом случае напыление производят на поверхность оправки, которую после окончания процесса удаляют: остается оболочка из напыленного материала.
8. Технологический процесс напыления обеспечивает высокую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью."

ОПИСАНИЕ ЭДМ:

"В электрометаллизаторе установлены направляющие, через которые непрерывно производится подача двух распыляемых проволок. Между концами этих проволок возбуждается электрическая дуга. В центральной части электрометаллизатора имеется сопло, через которое подается сжатый воздух. Струя сжатого воздуха отрывает с проволок-электродов частицы расплавленного металла и уносит их к напыляемой поверхности.

Электрометаллизатор может работать как на постоянном, так и на переменном токе. При использовании переменного тока дуга горит неустойчиво и сопровождается большим шумом. При постоянном токе характер работы является устойчивым, напыленный материал имеет мелкозернистую структуру, производительность напыления высокая. Поэтому в настоящее время для дугового напыления используют источники постоянного электрического тока. Для напыления обычно используют проволоку диаметром 0,8; 1,0; 1,6 и 2,0 мм.

Преимуществом способа электродуговой металлизации является высокая производительность процесса и возможность значительного сокращения затрат времени на напыление. Например, при силе тока 750 А можно напылять стальное покрытие с производительностью 36 кг/ч, что превышает в несколько раз производительность газопламенного напыления. По сравнению с газопламенным напылением металлизация позволяет получать более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытие из их сплава. Эксплуатационные затраты электрометаллизатора довольно небольшие. При напылении покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательно использовать такие электрометаллизаторы, которые бы позволяли производить отдельную регулировку скорости подачи каждого электрода.

Недостатком рассматриваемого метода является перегрев и окисление напыляемого материала при малых скоростях подачи распыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в материале покрытия снижается на 40-60%, а кремния и марганца 10-15%). Это необходимо иметь в виду и применять для напыления проволоку, содержащую повышенное количество легирующих элементов."

Для всех способов ГТП имеются общие требования по подготовке поверхности:

"Процесс напыления включает следующие операции: предварительную обработку поверхности основы для обеспечения прочного сцепления напыляемого материала; напыление материала на основу горелкой для напыления; обработку покрытия после напыления, если в этом есть необходимость (термическая обработка, уплотнение покрытия, отделочная обработка).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ОСНОВЫ

Предварительная обработка поверхности основы является важным фактором для обеспечения прочного сцепления напыленного покрытия с деталью, так как в большинстве случаев соединение напыленного покрытия с основой происходит в результате механического сцепления. Следовательно, для того чтобы напыляемые частицы, которые ударяются и деформируются об основу, прочно сцеплялись с неровностями поверхности, основа должна быть достаточно шероховатой.

Помимо механического соединения напыленного покрытия с основой возможны и другие виды соединений, например сплавление напыляемого материала с материалом основы, образование химических соединений и т. д.

Увеличение прочности механического зацепления связано с увеличением площади поверхности основы и созданием большей активности основы, что также важно и для других видов соединений. Поэтому создание развитой шероховатости на поверхности основы является важным требованием.

Однако обеспечение шероховатости поверхности еще недостаточно для получения прочного соединения покрытия с основой.

Перед предварительной обработкой поверхности необходимо провести промывку и, насколько это возможно, удалить влагу, масло и другие загрязнения, а также окисные пленки.

В деталях из пористых материалов и чугунных отливках в порах может содержаться масло, которое при напылении в результате нагревания выделяется на поверхность, что в значительной степени ухудшает сцепление покрытия с основой. Поэтому такие детали после обычного обезжиривания должны быть подвергнуты отжигу при температуре 260-530°С, в процессе которого происходит выгорание масла, содержащегося в порах.

Окисные пленки удаляют с поверхности в основном механически обдувкой кварцевым песком, корундом или стальной крошкой. Для удаления окисных пленок со стальных деталей иногда используют травление в азотной, соляной и других кислотах.

СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ

Существуют следующие способы подготовки поверхности перед напылением: дробеструйный; механический; напыление тонкого подслоя молибдена, прочно сцепляющегося с основой; электроискровой, при котором на поверхности остаются наваренные частицы присадочного материала; химический.

Дробеструйная обработка. Используют два типа устройств: пневматические и центробежные. В устройствах с пневматической подачей абразивные частицы разгоняются сжатым воздухом и, вытекая из сопла в виде струи, ударяются с большой скоростью об обрабатываемую поверхность. В центробежных устройствах абразивные частицы непрерывно подаются во вращающееся с большой скоростью лопаточное колесо, где они разгоняются и под действием центробежных сил устремляются на обрабатываемую поверхность.

При электродуговой металлизации, как и при газопламенном напылении, необходима предварительная обработка поверхности основы.

Проволоки-электроды напыляемого материала подаются по направляющим горелки, к которым подведено напряжение. При замыкании между концами проволок образуется дуга. При напряжении 15-25 В образуется дуга, которая носит неустойчивый, прерывистый характер. При больших значениях напряжения дуга становится непрерывной и устойчивой. Хорошие результаты горения дуги получаются в том случае, когда дуговой промежуток является небольшим и составляет примерно 0,8 мм.

В электрометаллизаторе угол между электродами (напыляемой проволокой) обычно составляет 30-60°. При углах, превышающих 60°, процесс напыления становится чувствительным к изменению условий напыления и нестабильным. При работе электрометаллизатора на постоянном токе напыляемая проволока, выполняющая функции анода, расплавляется приблизительно на 50% быстрее, чем катод (теоретически на аноде выделяется 66% тепловой энергии дуги). Значит, анодную проволоку следует подавать быстрее катодной. Однако на практике не возникает необходимости в разных скоростях подачи электродов. Поэтому проволоки подаются с одинаковой скоростью.

Наиболее важным при напылении является правильная регулировка тока, позволяющая уравновесить скорости подачи проволок со скоростью их расплавления и таким образом обеспечить постоянство длины дуги. При напылении расстояние от электрометаллизатора до покрываемой поверхности обычно составляет 100-200 мм."

ОБРАБОТКА НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Покрытие, полученное после напыления, по своей структуре является в значительной степени пористым. Пористость его можно в некоторых случаях эффективно использовать. Однако наиболее широкое применение находят плотные покрытия. Заполнять поры можно путем нанесения на покрытие слоя краски, пропиткой покрытия специальными составами.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ

В ряде случаев не обязательно слишком точно выдерживать толщину напыляемого покрытия. Необходимо учитывать, что после напыления поверхность получается грубой. Поэтому, когда необходимо получить чистую поверхность с точными размерами, напыленное с некоторым припуском покрытие подвергают механической обработке. Основными видами механической обработки напыленных покрытий является резание и шлифование.

Покрытия из углеродистых и коррозионностойких сталей. Для обработки покрытий из углеродистых и коррозионностойких сталей можно использовать быстрорежущий и твердосплавный инструмент. Можно проводить как мокрое, так и сухое шлифование напыленных покрытий. Мокрое шлифование предпочтительнее в случаях, когда не возникает проблем, связанных с проникновением охлаждающей жидкости в поры покрытия. Грубое шлифование (как сухое, так и мокрое) может привести к образованию трещин на шлифуемой поверхности. Поэтому, чтобы после шлифования получить хорошую

поверхность, необходимо правильно выбрать шлифовальный круг и режимы шлифования. Обычно для шлифования напыленных покрытий используют круги со сравнительно грубой структурой и непрочной связкой. Окончательная обработка производится при очень малых подачах.

После окончательного шлифования поверхность покрытия должна иметь матовый блеск и содержать мелкие поры. Слишком блестящая поверхность, на которой отсутствуют поры, указывает на неправильное шлифование и возможность ее засаливания.

Уплотнение покрытия, заполнение его пор уплотняющими материалами, когда это необходимо, производят перед шлифованием. Уплотняющие материалы препятствуют проникновению в поры покрытия частиц абразивных материалов, используемых при шлифовании. Если поры покрытия не заполнены уплотняющими материалами, то после шлифования необходимо промыть покрытие и удалить частицы, попавшие в него при шлифовании. Это особенно важно для покрытий, наносимых на поверхность подшипников.

Покрытия из мягких материалов (олова, цинка, баббита) можно хонинговать, в результате чего получается гладкая поверхность с незначительной пористостью.

Для каких целей применяется электродуговая металлизация?

При электродуговом напылении материалы должны обладать электропроводностью, их используют только в виде проволоки.

Напыленные покрытия используют для придания поверхностям деталей различных конструкций, машин и приборов таких свойств, как износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость, а также в качестве тепло- и электроизоляции и т. д.

Конструкционные материалы, из которых изготовляют различные строительные конструкции, резервуары для химических продуктов, суда и другие сооружения, при строительстве обрабатывают напылением. Напыление в этом случае применяют для защиты от коррозии. На деталях машин и аппаратов напыление в основном используют для ремонта участков, которые износились в процессе эксплуатации в результате трения или эрозии. Напылением сравнительно просто наносить покрытия на участки из самых разнообразных материалов и надежно защищать эти участки. При умелом использовании особенностей напыления еще на стадии проектирования можно в значительной степени повысить экономичность конструкции и ее технические характеристики.

Применение напыления в общем машиностроении. Коррозионностойкость и износостойкость являются важными характеристиками напыленных покрытий, которые в значительной степени определяют области их применения.

НАПЫЛЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ИСПОЛЬЗУЮТ:

- в автомобильной промышленности - кулачковый вал, головка клапана, вал водяного насоса, шкворень, кулачки тормоза, поршень, цилиндр, пластина муфты, выхлопной клапан и др.;
- в цементной промышленности - крыльчатка воздуходувок, детали конвейеров, клапаны и седла клапанов, подшипники;
- в химической промышленности - клапаны и седла клапанов, крыльчатка и оси насосов, кислотостойкие плунжеры насосов, втулки, кольца и др.;
- в угольной и металлообрабатывающей промышленности - лопатки насосов, детали проходческих комбайнов, защитные экраны, детали пневмооборудования, матрицы, пуансоны и другие детали штамповочного оборудования и др.;
- в станкостроительной промышленности - различные калибры, оправки, детали полировальных станков, втулки уплотнений, центры токарных станков, шнеки;
- в энергетической промышленности - шнеки для подачи каменного угля, вентиляционное оборудование, паровые клапаны, детали конвейеров и др.;
- в других областях - различные подшипники, коленчатые валы, вальцы, зубчатые колеса (зубья) и др.

Применение напыления в областях, требующих коррозионной стойкости покрытий и стойкости к окислению. Цинковые покрытия (толщина 0,08-0,38 мм) используют обычно для защиты стали в воздушной атмосфере, а также в пресной и соленой воде.

Покрытия наносят на стальные конструкции, мосты, башни, шлюзы, суда, резервуары для хранения воды, трубопроводы, различное шахтовое оборудование, газовые емкости, моечные устройства, воздухоподогреватели, насосы, стальные шасси, перила и др.

Алюминиевые покрытия (толщина 0,13-0,51 мм) используют для защиты стали в обычной и промышленной атмосферах, а также морской воде, как при комнатной, так и при повышенной температуре.

Покрытия наносят на резервуары для хранения воды, стальные конструкции, работающие в промышленных районах в сернистой атмосфере, оборудование пищевой промышленности, камеры сгорания, дымоходы, корпуса судов и т. д.

ДЕТАЛИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для повышения износостойкости, жаростойкости и эрозионной стойкости деталей авиационных реактивных двигателей применяют самые различные типы напыляемых покрытий. Широко используют напыление при капитальном ремонте двигателя, для восстановления изношенных деталей.

ПОДШИПНИКИ

Вместо бронзовых подшипников в мощных машинах используют чугунные, на которые напыляют бронзовые покрытия. Наличие мельчайших пор в покрытии позволяет продолжительное время сохранять смазку в подшипнике. Поэтому при недостаточной подаче смазки условия работы подшипника с напыленным покрытием будут лучше, чем условия работы подшипников из бронзы. Преимущество подшипников с напыленным бронзовым покрытием заключается также в том, что на их изготовление расходуется небольшое количество бронзы. Это дает возможность использовать для напыления подобных подшипников высококачественную бронзу.

На одном из металлообрабатывающих предприятий ФРГ для гидравлического пресса усилием 600 тс используют подшипник с напыленным покрытием, которое наносилось газопламенным напылением. Долговечность этого подшипника в 3-4 раза выше долговечности обычного литого бронзового подшипника, а стоимость на 35% меньше.

Покрытие наносят следующим образом. Внутреннюю поверхность отливки после чистовой механической обработки готовят нарезанием рваной резьбы с шагом 0,6-1 мм. На подготовленную поверхность после предварительного разогрева газопламенным проволоочным напылением наносят слой молибдена толщиной 0,1 мм. Затем на этот слой напыляют слой бронзы с припуском на чистовую обработку.

РЕМОНТ РОТОРА ТУРБИНЫ

Напыление используют для ремонта ступицы ротора турбины. На обрабатываемую поверхность напыляют подслои молибдена, на который затем наносят коррозионностойкую сталь 420.

РЕМОНТ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Рассмотрим один из примеров ремонта зубчатых колес напылением. При ремонте зубчатых колес на обрабатываемой поверхности вала нарезают мелкую рваную резьбу глубиной 0,25-0,38 мм, а затем проводят обдувку абразивными материалами. После этого напыляют коррозионностойкую сталь 410, поверхность покрытия шлифуют и подвергают воронению.

После ремонта проводили контрольную сборку и разборку. Колесо охлаждали до температуры -40°C и вставляли в подшипники, после чего подшипники снимали с зубчатого колеса. Сборку и разборку производили 5 раз. Исследование соединения и поверхности покрытия показало, что после таких испытаний обеспечивается хорошая посадка. Описанный способ восстановления зубчатых колес может быть использован при капитальном ремонте.

НАПЫЛЕНИЕ СТАЛИ НА НАПРАВЛЯЮЩИЕ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

На направляющие металлообрабатывающих станков (например, токарных) можно напылять покрытие из углеродистой (0,45-0,55% C, 0,08-0,15% Si, 0,25-0,40% Mn) или хромистой (1,0-1,1% C, 0,15-0,35% Si, 0,2-0,4% Mn, 0,9-1,2% Cr) стали. Технология напыления заключается в следующем. После грубого шлифования чугунных направляющих обрабатываемые поверхности тщательно обезжиривают и обдувают карборундом или металлической крошкой, после чего на них зубилом делают насечки. Можно также производить закругление поверхности электроискровым методом. Вслед за этим производят напыление. После напыления желательно, чтобы покрытие остывало медленно и равномерно, поэтому его закрывают тканью, что позволяет увеличить продолжительность остывания. При ремонте направляющих, имеющих небольшой износ, достаточно напылять покрытия толщиной примерно 1,5 мм. После напыления поверхность шлифуют абразивными кругами из карбида кремния (зернистость 350-400 мкм).

Важно, чтобы поверхность, на которую производят напыление, не перегревалась, так как при перегреве в покрытии возникает сетка мелких трещин. Срок службы направляющей с покрытием в 2-3 раза превышает срок службы обычной чугунной направляющей. При работе, как правило, напыленное покрытие не отслаивается. Все это указывает на необходимость еще на стадии проектирования металлообрабатывающего станка предусматривать нанесение покрытий напылением на направляющие.

КРЫЛЬЧАТКА ВОЗДУХОДУВК

Правильно выбранное для напыления покрытие обычно обладает хорошей износостойкостью. В качестве примера можно рассмотреть покрытия, защищающие поверхность от эрозии, вызываемой высокоскоростным потоком частиц. В керамических покрытиях, напыленных со связующим веществом, достаточно мягким и обладающим низким сопротивлением износу, может возникнуть избирательная

эрозия. Такая эрозия сопровождается вторичной эрозией, происходящей под действием твердых частиц, выкрашивающихся из напыленного покрытия.

Однако есть много примеров, когда подобного типа покрытия обладали хорошей эрозионной стойкостью при работе в устройствах, транспортирующих и перемешивающих порошковые материалы в машиностроении, металлургии и горном деле. Стойкость таких покрытий в значительной степени определяется правильным выбором материала.

Примером может служить молибденовое покрытие, напыленное на лопатки большой воздуходувки, используемой на установке, отделяющей угольную пыль на шахте в Англии. Для определения эрозионной стойкости такого покрытия на часть лопаток около ступицы, где происходил наиболее интенсивный износ, напыляли слои толщиной 0,08-0,13 мм. После 1500 ч работы на участках, где имелось покрытие, практически не наблюдалось следов износа. На незащищенных же участках произошло значительное уменьшение толщины лопаток.

Покрытия, напыленные на лопатки воздуходувок, предназначенных для транспортировки высокотемпературных агрессивных газов на сталелитейных, химических и цементных заводах, позволили в значительной степени продлить срок службы лопаток.

КОРПУС БУКСИРА

Напыление тонкого алюминиевого покрытия на корпус буксира позволило в значительной степени повысить его коррозионную стойкость в морской воде. Общая площадь поверхности, на которую было напылено покрытие, составила 482 м².

Перед напылением покрытия поверхность очищали и подвергали пескоструйной обработке. Затем наносили слой алюминия толщиной 0,08-0,10 мм. Образующиеся в напыленном покрытии поры уплотняли. На напыленное покрытие наносили слой винилового красителя с последующим нанесением на его еще одного слоя трибутилцинковой краски для придания покрытию стойкости к загрязнениям. В случае повреждения покрытия с поверхности соскабливают верхний слой краски и наносят новый слой трибутилцинковой краски. Такой ремонт не вызывает значительных трудностей и проводится за довольно короткий промежуток времени.



О типах антикоррозионных покрытий

Практически все металлоконструкции должны иметь защитные покрытия для обеспечения работоспособности данной металлоконструкции планируемый срок службы.

Это могут быть мостовые сооружения, трубопроводы, линии электропередач, портовые сооружения, транспортные средства, оборудование для нефте- и газодобычи и т.д.

Например, применение защитных покрытий на оборудовании для нефтедобычи окупает затраты на технологию покрытий в течение нескольких месяцев.

Среди защитных покрытий антикоррозионные занимают особое место. Они применяются очень широко и без них коррозионные повреждения наносят существенный, часто решающий, ущерб.

При выборе антикоррозионного покрытия исходят из следующих факторов:

- необходимый срок службы покрытия;
- стоимость покрытия;
- воздействие окружающей среды;
- техническая возможность реализации покрытия.

При выборе покрытия рекомендуется провести подробные консультации со специалистами, так как оптимальный выбор покрытия предполагает учёт нескольких взаимосвязанных факторов. Ошибки при выборе покрытия приводят к значительным расходам, как при создании покрытия, так и при его эксплуатации.

Для металлоконструкций, работающих в сельской местности, в городской, индустриальной или морской среде в различных климатических зонах при отсутствии воздействия на поверхность механических ударных нагрузок и локальных термических воздействий аналогичных газосварки, можно рассматривать три типа антикоррозионных покрытий:

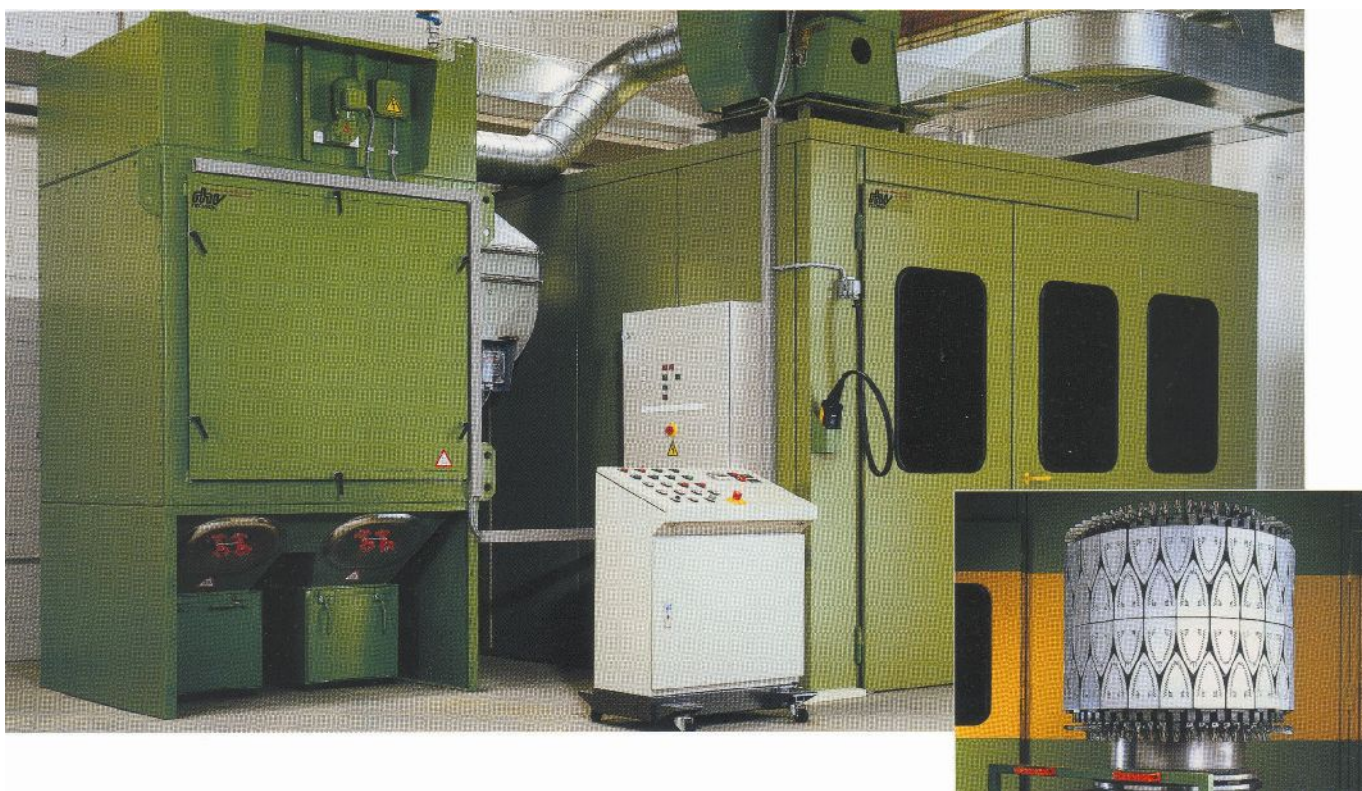
1. Всевозможные лакокрасочные покрытия (эпоксидные, полиуретановые, акриловые и т.д.), срок службы 6 – 25 лет, относительно низкая стоимость и высокая технологичность.
2. Металлизационные электродуговые цинковые или алюминиевые покрытия. Срок службы около 50 лет. Активная электролитическая защита покрытой металлоконструкции, «самозалечивание» микропор и мелких повреждений продуктами электролиза. Для нанесения покрытия требуется специальное оборудование. Как любое металлизационное покрытие имеет микропоры.
3. Металлизационно-полимерные покрытия. Сначала наносится металлизационное покрытие из цинка, алюминия или другого металла, а затем металлизационное покрытие пропитывается лакокрасочным материалом. Лакокрасочное покрытие должно иметь низкую вязкость для проникновения в поры металлизационного покрытия и то же время создавать тонкую плёнку на поверхности металлизационного покрытия. Такая структура покрытия обладает чрезвычайно высокой коррозионной стойкостью, а также, в сравнении с другими типами покрытий, высокими механической прочностью и износостойкостью. Срок службы практически не ограничен и обычно составляет «нормативный срок службы металлоконструкции». Это подтверждается мостовыми металлоконструкциями.

Для всех трёх типов покрытий требуется тщательная подготовка поверхности струйно-абразивными технологиями, определяющая в значительной мере адгезионную прочность покрытия.

Оборудование для нанесения покрытий (примеры)



Автоматизированный вращатель для напыления деталей



Шумозащитная кабина с фильтром для нанесения покрытий

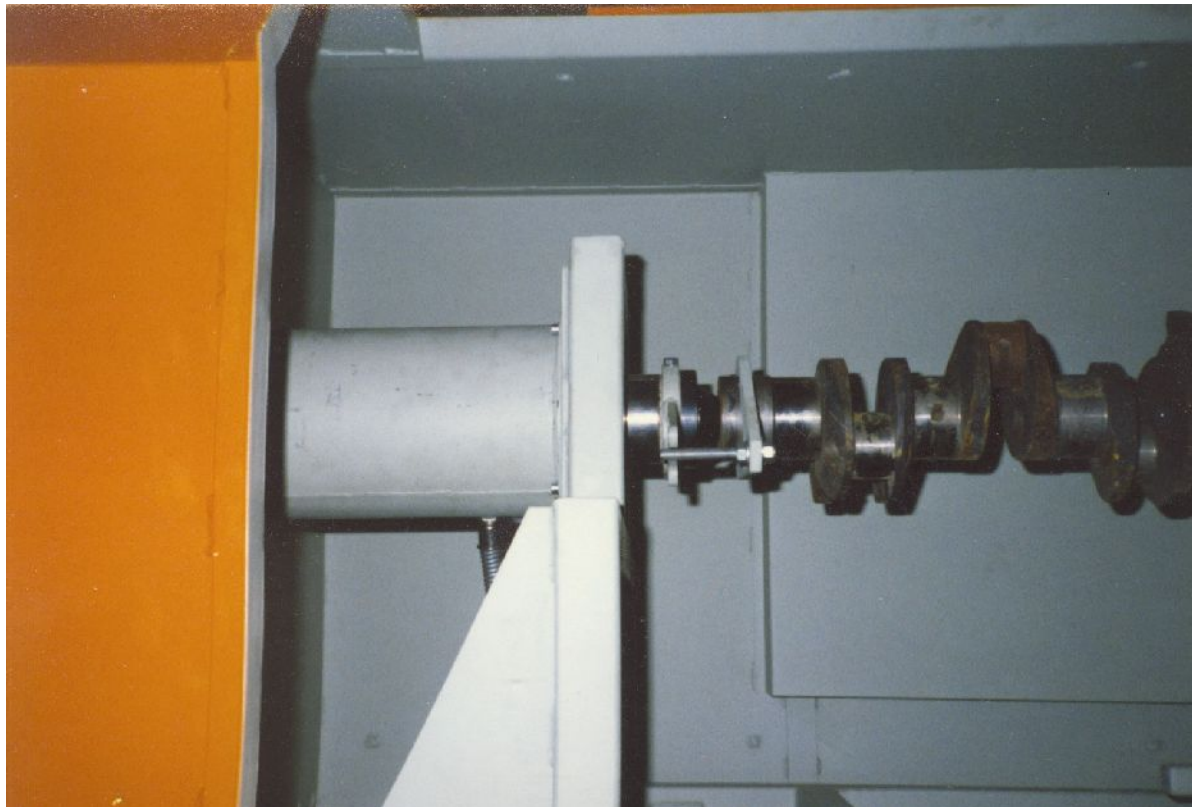
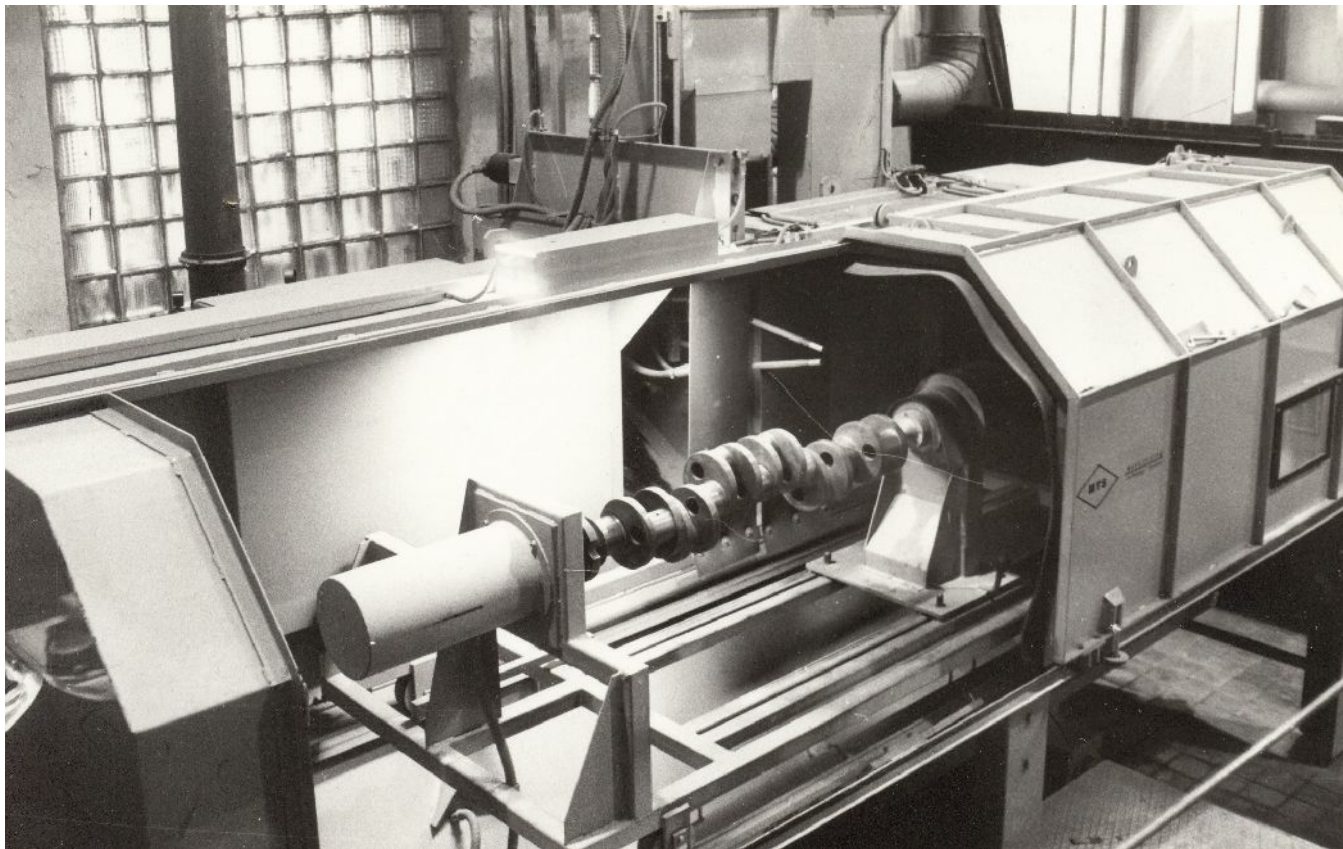


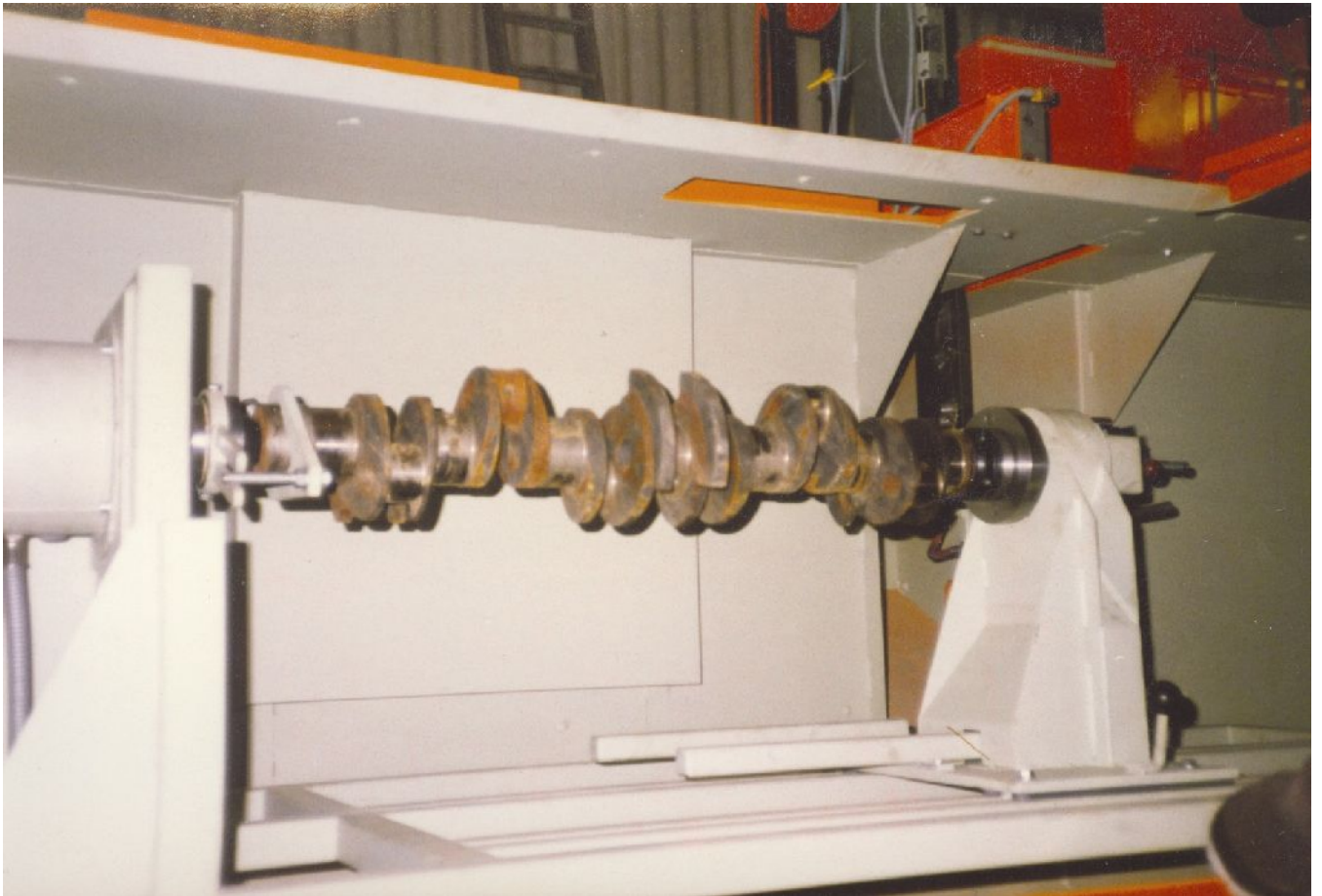
Шумозащитная кабина и установка плазменного напыления

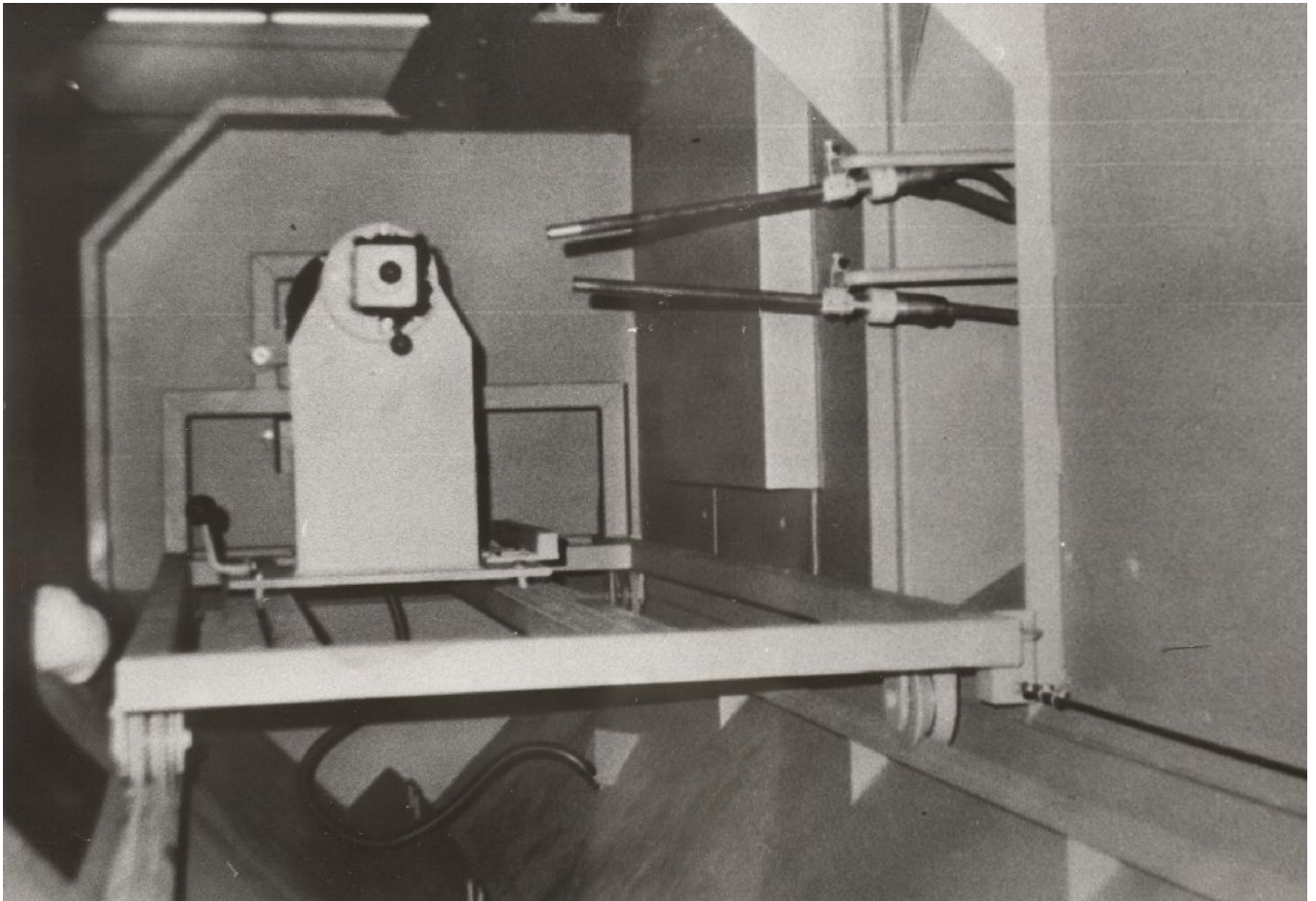


Цех механической обработки напылённых деталей

Автоматизированная камера для струйно-абразивной обработки шеек коленчатых валов длиной до 2 м.

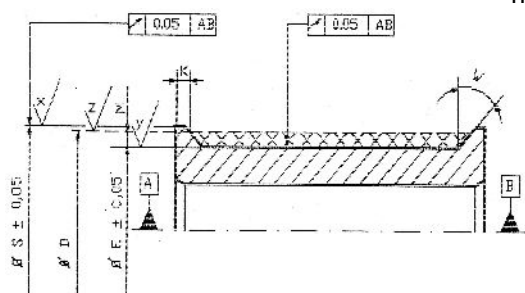






Электродуговая металлизация многих типов коленчатых валов успешно производится с использованием порошковой проволоки ФМИ-2.

Схематичный пример нанесения покрытия на цилиндрическую деталь. Покрытие из окиси хрома плазмой.

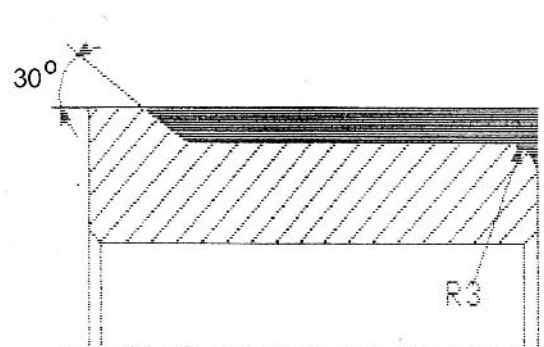
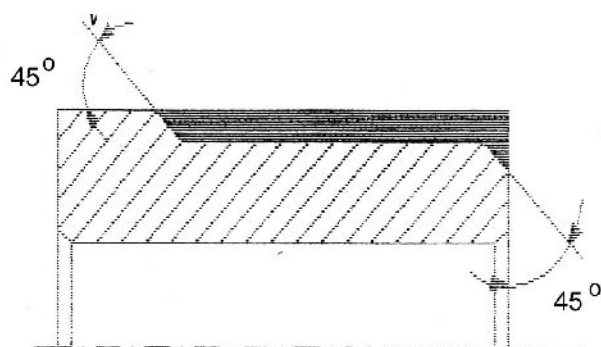


$D =$ номинальный диаметр
 $E = D - 0,70 \text{ mm}$ размер перед напылением
 $S = D + 0,20 \text{ mm}$ размер перед шлифовкой
 $M = 0,35 \text{ mm}$ толщина покрытия
 $K \geq 1,00 \text{ mm}$ размер кромки
 $W = 45^\circ$ угол

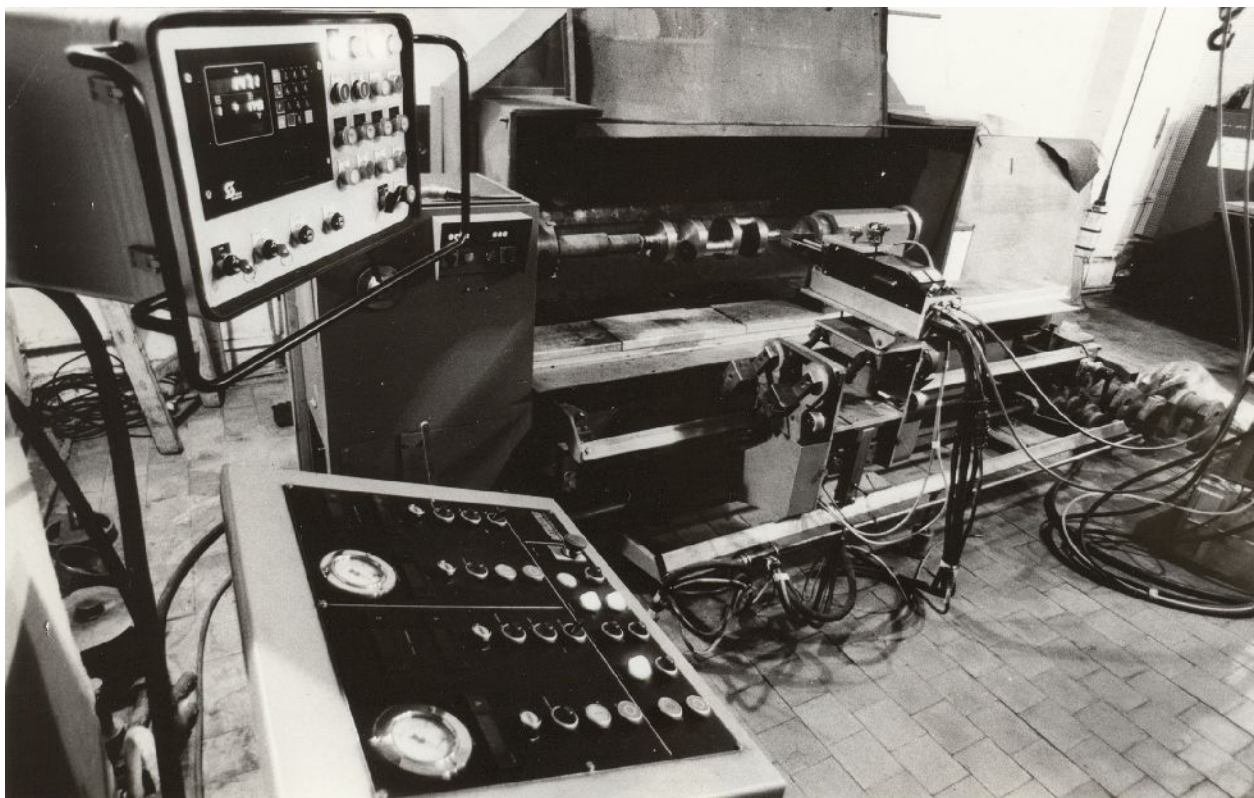
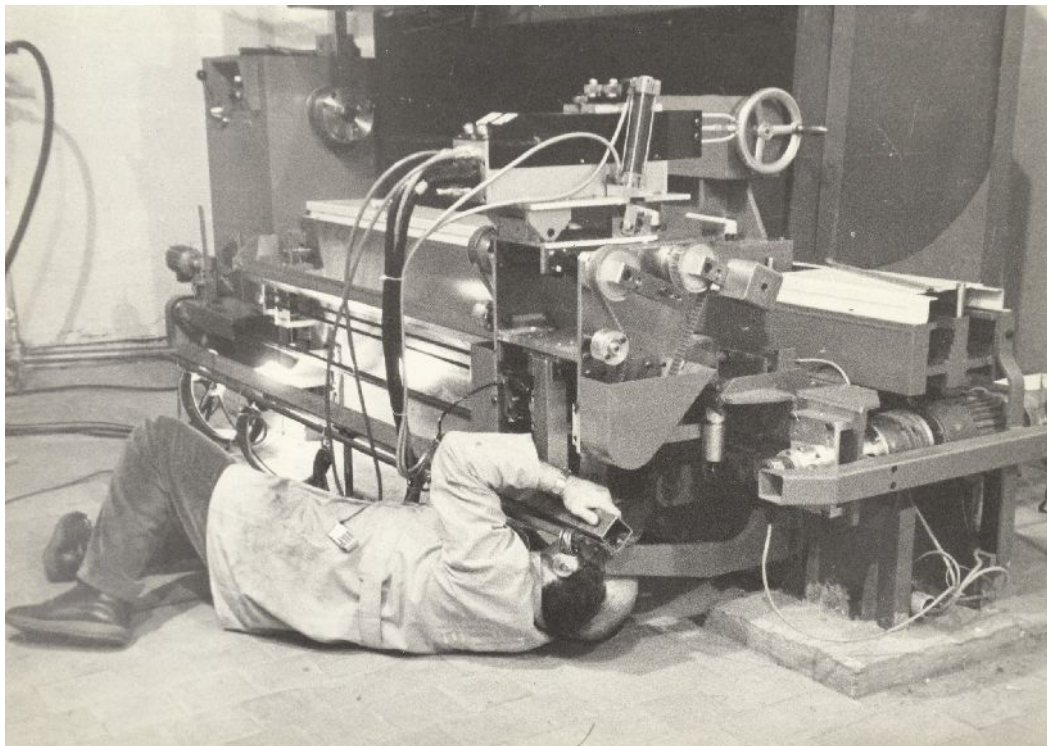
Примеры нанесения покрытий на канты.

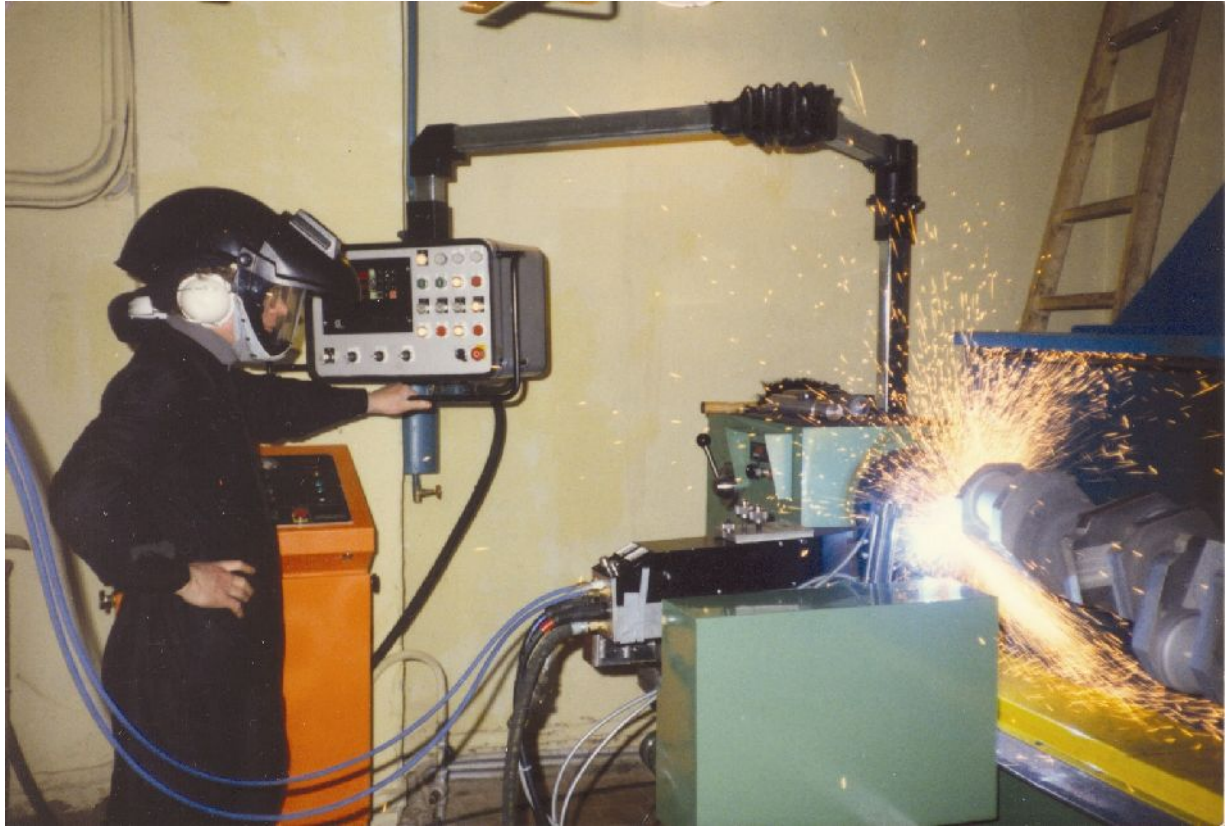
а) Покрытие из металла или керамики

б) Напыление с оплавлением



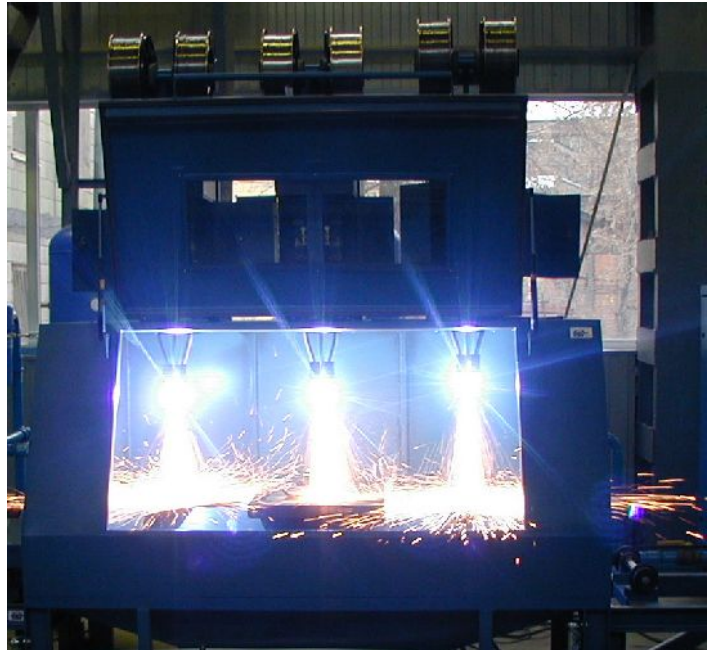
Автоматизированная установка электродуговой металлизации шеек коленчатых валов до 2 м.





Некоторые изготовители оборудования.

1. ООО "Термал-Спрей-Тек"



Установка электродуговой металлизации типа С-14-А



Образцы покрытий цинком



Струйно-абразивная камера эжекционного типа для подготовки напыляемой поверхности.

2. Sulzer Metco Europe GmbH

www.sulzermetco.com

3. OSU Hessler GmbH & Co. KG

www.osu.de

4. Metallization Ltd.

www.metallisation.com

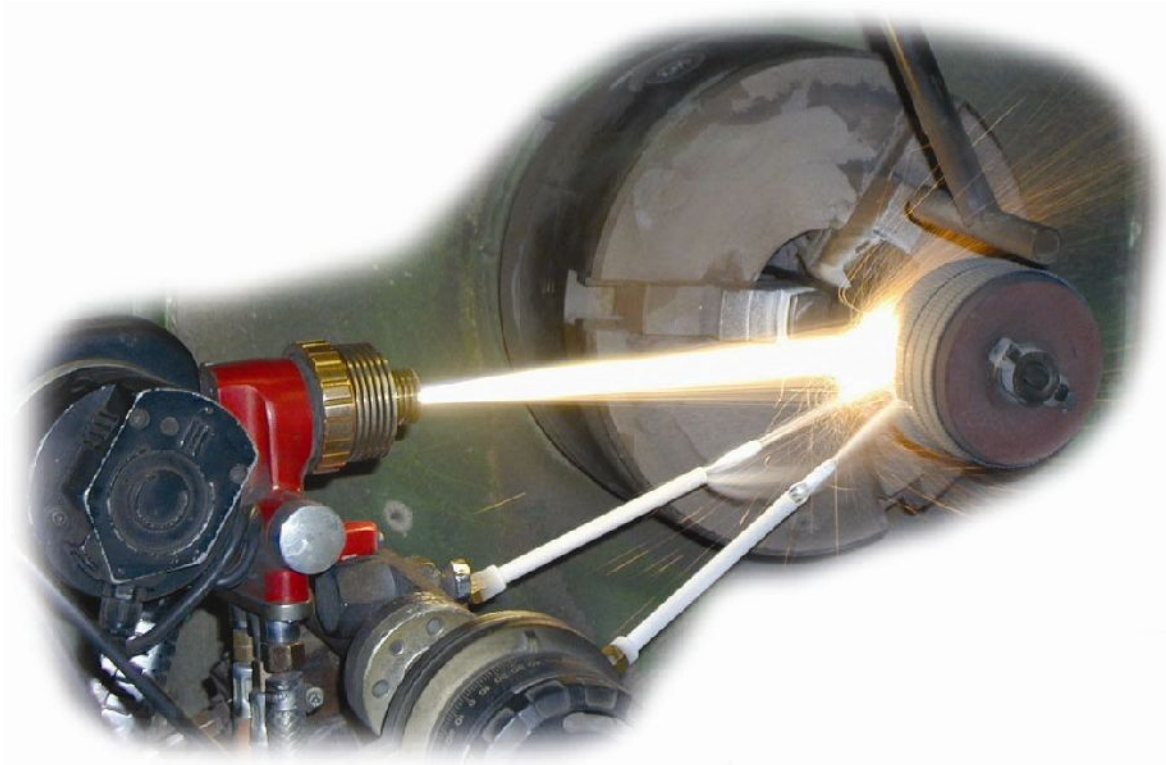
5. Беспылевая струйно-абразивная установка фирмы Munk + Schmitz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG

www.munk-schmitz.de

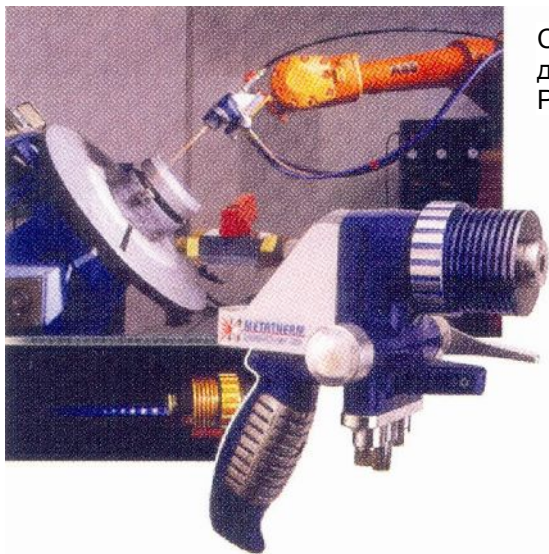


Головная часть



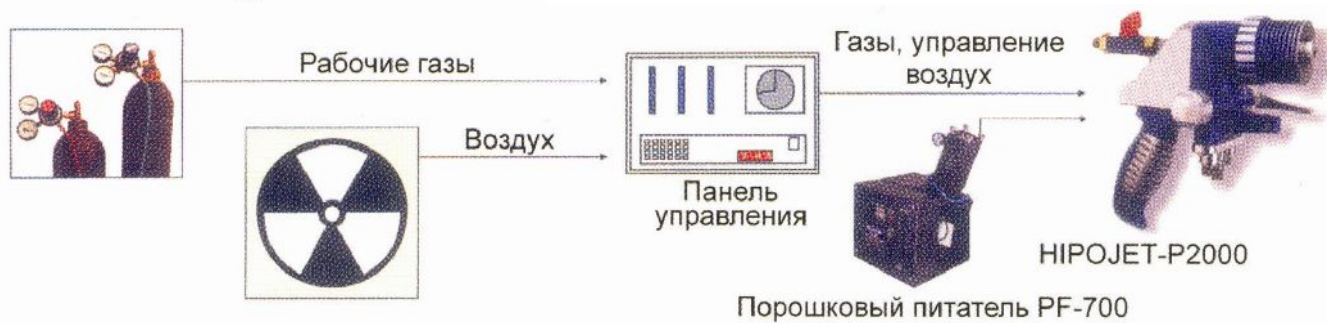


Сверхзвуковое напыление газопламенным пистолетом HVOF-1000.



Сверхзвуковой газопламенный пистолет HIPOJET-P2000 для напыления порошками -25+5мкм.
Рабочие газы: кислород, пропан.

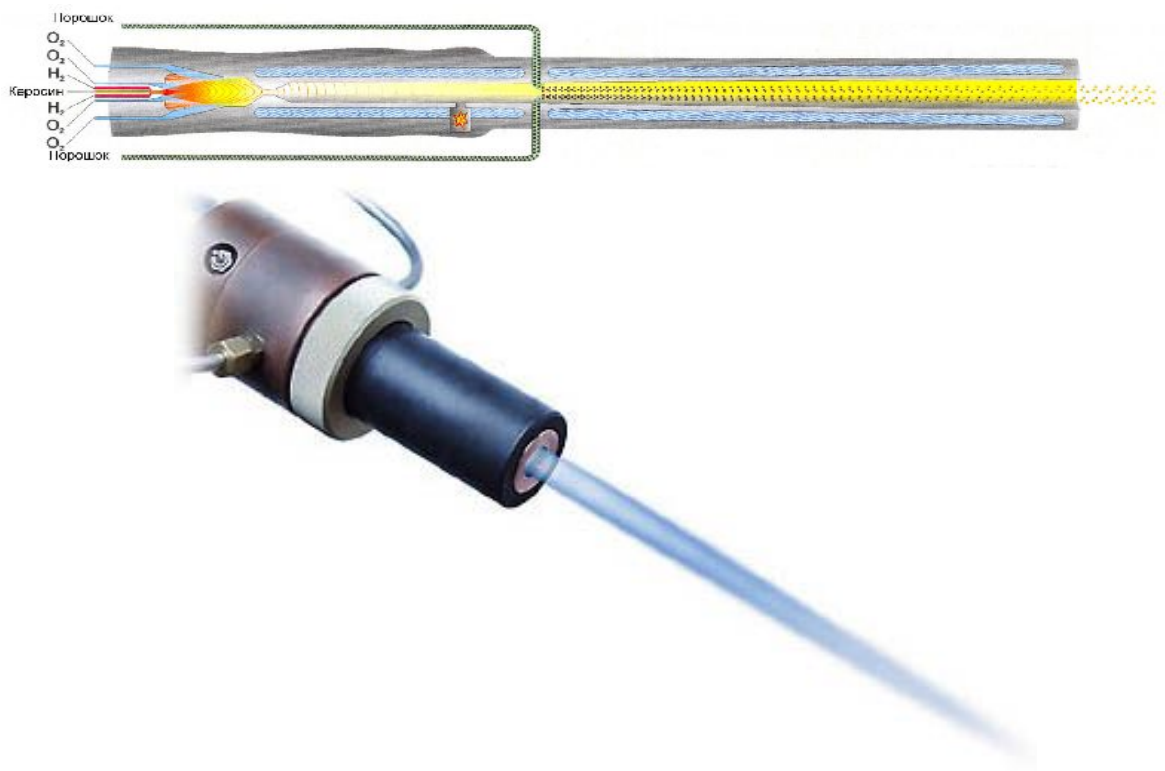
Схема подключения HIPOJET-P2000



7. Thermico GmbH & Co. KG

www.thermico.biz

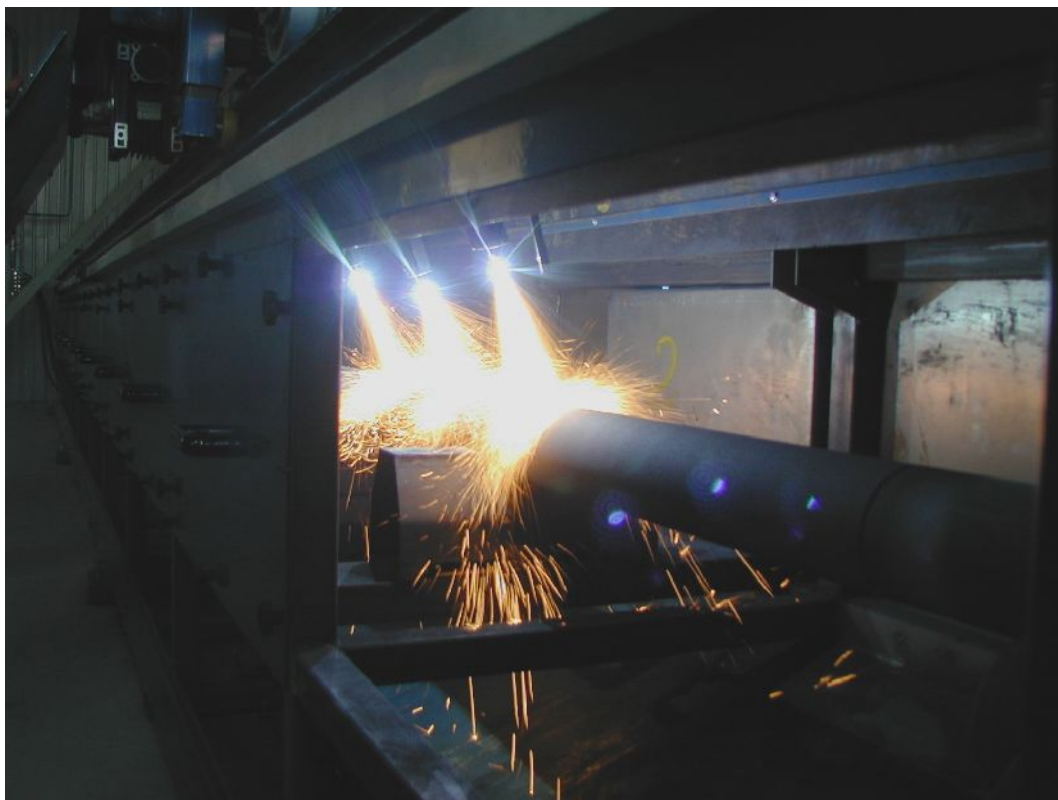
Схема сверхзвуковой газопламенной горелки типа C-CJS



8. ООО «Термал-Спрей-Тек» и ООО «Обработка поверхности»

www.t-s-t.ru

Программируемая линия для металлизации труб.



Нормативные документы

Российские

ГОСТ 28302-89
ПОКРЫТИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ЗАЩИТНЫЕ ИЗ ЦИНКА И АЛЮМИНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
Общие требования к типовому технологическому процессу

ГОСТ 28844-90
ПОКРЫТИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ И ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕ
Общие требования

ГОСТ 9.304-87 (СТ СЭВ 4202-83)
ПОКРЫТИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ
Общие требования и методы контроля

ГОСТ 9.302-88
ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ
Методы контроля

ГОСТ 9.301-86
ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ
Общие требования

ГОСТ 26939-86
АППАРАТЫ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПО СПОСОБУ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ
Общие технические требования

ГОСТ 9.402-80 (СТ СЭВ 5732-86)
ПОКРЫТИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫЕ
Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием

ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77)
ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ
Параметры, характеристики и обозначения

Европейские

DIN EN 582
Ermittlung der Haftzugfestigkeit

DIN EN 657
Thermisches Spritzen
Bedriffe, Einteilung

DIN EN 13507
Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkstücke und Bauteile für das themische Spritzen

DIN EN ISO 14918
Pruefung von thermischen Spritzern

DIN 32521
Abnahmebedingungen und Qualitätsprüfung für Anlagen zum themischen Spritzen

DIN 55928 Teil 4
Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge
Vorbereitung und Prüfung der Oberflächen

DIN EN 22063
Thermisches Spritzen

DIN 8566
Zusätze für das thermische Spritzen

DIN 8566 Teil 1
Zusätze für das thermische Spritzen
Massivdrächte zum Flammspritzen

DIN 8566 Teil 3
Zusätze für das thermische Spritzen
Fülldrächte, Schnüre und Stäbe zum Flammspritzen

DIN 8567

Vorbereitung von Oberflächen metallischer Werkstücke und Bauteile für das thermische Spritzen

Merkblatt DVS 2303-4

Zerstörungsfreies Prüfen von thermisch gespritzten Schichten

Merkblatt DVS 2307-1

Arbeitsschutz beim Entfetten und Strahlen von Oberflächen zum themischen Spritzen

Merkblatt DVS 2307 Teil 3

Arbeitsschutz beim Lichtbogenspritze

Установка электродуговой металлизации С-12-В.

Нанесение покрытий на внутренние и наружные поверхности.

Начало выпуска декабрь 2008 года



Восстановление и упрочнение пресс-формы для производства бетонных блоков.



Введение к теме о процессе формирования газотермических покрытий и их прочности

Сарбучев С.Н.

Важнейшей проблемой современной техники является повышение надёжности и долговечности машин и оборудования, осуществляемой, как правило путём упрочнения отдельных узлов, лимитирующих срок службы изделия, или их восстановления.

Одним из способов упрочнения и восстановления различных деталей и узлов машин и механизмов, а также создания материалов, отвечающих повышенным эксплуатационным требованиям, является газотермическое нанесение покрытий.

Технология газотермического нанесения покрытий имеет широкие возможности как в области сочетания материалов покрытия и подложки, так и по размерам и форме защищаемых объектов. Практическое использование покрытий ограничивается некоторыми их основными свойствами: низкая прочность сцепления, в результате чего покрытия могут отделяться от подложки; газопроницаемость покрытий вследствие их пониженной плотности и наличия сквозных пор; нестабильность свойств в различных участках покрытия, что приводит к местным выколам даже казалось бы доброкачественного покрытия.

В настоящей работе рассматривается процесс формирования газотермических покрытий, некоторые аспекты управления процессом формирования газотермических покрытий с целью получения необходимых свойств покрытий. В том числе, специальная защитная оснастка и её роль в формировании краевых галтелей в процессе напыления.

Процесс газотермического напыления заключается в том, что материал для покрытия вводится в источник тепла, температура которого достаточно высока, чтобы его пластифицировать. При «холодном» напылении, способе, относящемся также к газотермическим способам напыления, порошковый материал не подвергается нагреву, а разгоняется сверхзвуковым потоком газа до энергии пластификации на подложке. В общем случае газотермических покрытий, поток газа, обладающий высокой скоростью, захватывает частицы и с очень большой скоростью направляет их на предварительно подготовленную поверхность. Последовательно накладываясь друг на друга, частицы образуют чешуйчатое слоистое покрытие с сильной анизотропией физических и механических свойств. Материал для покрытия может быть в виде порошка, проволоки, стержня, ленты или шнура. Характерный размер частиц в потоке газа от 5 до 200 мкм. Характерная толщина покрытий около 1 мм.

Газотермические методы универсальны и поэтому могут с большой эффективностью применяться на всех уровнях производства – от заводов до передвижных ремонтных мастерских. Универсальность и эффективность определяются следующими принципиальными особенностями газотермического напыления:

- возможностью нанесения покрытий из самых различных материалов – цветных металлов и сталей, сплавов и интерметаллидов, соединений, органических веществ или композиций на их основе;
- возможностью нанесения покрытий на различные материалы – металлы, пластмассы, стекло, дерево, ткань, бумагу, керамику и т.д.;
- отсутствие деформации изделия, на которое покрытие наносится;
- небольшой потребностью в материалах для покрытий, т.к. их толщина обычно составляет до 1 мм;
- сравнительной простотой оборудования для напыления и относительно низкой трудоёмкостью процесса, поскольку он отличается высокой производительностью, которая для различных процессов составляет от 1 до 20 кг/час;

Методы газотермического напыления отличаются по уровню температур и удельных энергий источников тепла, а также, соответственно, формой и характеристикой распыляемого материала.

Так для электродуговой металлизации может использоваться только проволока, для газопламенного напыления как проволока, так и порошки, стержни, шнуры; детонационным способом можно наносить только порошки.

Использование технологии газотермического напыления имеет свои особенности. Область использования технологии, основанная на возможности придания напыляемой поверхности практически любых служебных свойств, ограничена прочностью покрытий, на порядок ниже прочности металлов.

Подвергнутые напылению поверхности как правило не должны испытывать прямых ударов, как, например, при ковке, или линейных нагрузок, которые преобладают, например, на валках прокатных станов.

Свойства и состав покрытий, в силу условий их формирования, обычно сильно отличаются от исходных распыляемых материалов.

Качество покрытий зависит от большого числа переменных факторов (по данным разных авторов до 60), таких как конструкция распылителя (плазмотрона, газовой горелки, электрометаллизатора и т.д.); род и расход газов; потребляемая мощность; физико-химические свойства; грануляция напыляемого материала и скорость его подачи; расстояние от распылителя до подложки (напыляемой поверхности); состав защитной атмосферы; способ подготовки поверхности изделия; температурный режим в процессе формирования покрытия и т.д. Поэтому в зависимости от напыляемого материала, а также от материала и формы изделия, обычно для каждого конкретного случая режим напыления подбирается экспериментально, руководствуясь общими положениями теории газотермических покрытий.

Наиболее общими причинами, определяющими свойства напыленных материалов, являются:

1. воздействие окружающей атмосферы на напыляемый материал;
2. пониженная прочность сцепления на границах между частицами и слоями покрытия, нанесенными за один проход, возникающая в следствие неполного схватывания, а также повышенного содержания окислов, пор и других включений в пограничных областях;
3. образование пористости в результате газовыделения и кристаллизации частиц с высокими скоростями, а также возникновение выплесков материала покрытия при ударе частиц и подложку;
4. изменение строения материала вследствие фазовых превращений и появление пересыщенных и нестехиометрических структур часто с присутствием большой доли аморфной фазы в результате химико-термического воздействия плазменной струи и закалки перегретых расплавов;
5. возникновение напряжений во всём объёме напылённого материала и в объёме каждой частицы.

Процесс газотермического нанесения покрытий можно разделить на следующие операции:

предварительная подготовка поверхности изделия под покрытие, собственно процесс газотермического нанесения покрытий и при необходимости последующая обработка нанесенного покрытия (оплавление, уплотнение, пропитка, термическая или механическая обработка). От каждой из этих операций зависят эксплуатационные свойства покрытий.

Предварительная обработка поверхности основы является важным фактором для обеспечения прочного сцепления напылённого покрытия с деталью, так как в большинстве случаев соединение напыленного покрытия с основой происходит в результате механического сцепления. Следовательно, для того чтобы напыляемые частицы, которые ударяются и деформируются об основу, прочно сцепились с неровностями поверхности, основа должна быть достаточно шероховатой.

В некоторых отдельных случаях помимо механического соединения напылённого материала с материалом основы, имеет место образование химических соединений.

Увеличение прочности механического зацепления связано с увеличением площади поверхности основы и созданием большей активности основы, что также важно и для других видов соединений. Поэтому создание развитой шероховатости на поверхности основы является важным требованием.

Однако обеспечение шероховатости поверхности ещё не достаточно для получения прочного соединения покрытия с основой.

Перед предварительной обработкой поверхности необходимо провести промывку, удалить влагу, масло и другие загрязнения.

В деталях из пористых материалов и чугунных отливках в порах может содержаться масло, которое при напылении в результате нагрева выделяется на поверхность, что значительно ухудшает сцепление покрытия с основой. Поэтому такие детали после промывки подвергают отжигу, при котором происходит выгорание масла, содержащегося в порах.

Для подготовки поверхности широко применяется струйно-абразивная обработка поверхности перед напылением. Такая подготовка очищает поверхность и выводит её из состояния термодинамического равновесия со средой, освобождая межатомные связи поверхностных атомов, т.е. химически активизирует подложку. Но активность подложки быстро снижается из-за химической адсорбции газов из атмосферы и окисления. Струйно-абразивная обработка делает поверхность шероховатой, что увеличивает температуру в контакте под напылёнными частицами на выступах шероховатости и повышает суммарную площадь участков приваривания. Шероховатая поверхность имеет большую площадь по сравнению с гладкой, что также способствует увеличению прочности сцепления.

В месте удара абразивной частицы подложка разрушается и обнажается так называемая ювенильная поверхность её материала, однако, на воздухе она очень быстро теряет активность.

Другие способы подготовки поверхности в данной работе не рассматриваются.

Каждый из существующих методов напыления имеет технологические особенности и режимы, которые определяются особенностями конструкции распылителя, родом и формой напыляемого материала, размерами и свойствами изделия, на которое надо нанести покрытие, а также требованиями, предъявляемыми к напыляемому покрытию.

Одно из общих требований при выборе режима напыления для получения качественных покрытий – расплавление и доставка частиц напыляемого материала на поверхность изделия в расплавленном состоянии.

Результаты изучения взаимодействия материалов при напылении позволяют классифицировать и наметить наиболее рациональные технологические приёмы и методы регулирования свойств покрытий. Ниже приведена схема классификации.

С целью получения необходимого качества поверхности и точности размеров, а в ряде случаев и повышения прочности связи между изделием и напылённым слоем, а также уменьшения пористости покрытия, могут применяться различные способы обработки покрытия: термические (оплавление, отжиг, алитирование и т.д.), механические (токарная, шлифование, хонингование и т.д.), химические (нанесение красок, пропитка и т.д.).

Для газотермического напыления применяют различные источники энергии, используемые для нагревания и расплавления напыляемого материала. Пруток и проволока расплавляются с образованием частиц в виде капель; напыляемый порошок также расплавляется или принимает состояние, близкое к расплавленному. Расплавленные частицы с высокой скоростью соударяются с поверхностью основы и наслаиваются на неё, что приводит к образованию покрытия, которое может иметь самые различные свойства.

Двухфазный поток, состоящий из раскалённого газа и напыляемых частиц, и распределение частиц в потоке определяют не только их нагрев и ускорение, но и условия формирования покрытия и распределение его толщины по поверхности подложки.

Из практики известно, что, несмотря на высокую скорость истечения плазменных струй из плазматронов (1000 – 2000 м/сек), частицы напыляемого материала разгоняются до 50-200 м/сек. При газопламенном напылении и электродуговой металлизации скорости примерно такие же. Размер частиц в потоке при плазменном и газопламенном напылении обычно 40 – 100 мкм, электродуговой металлизации 50 – 400 мкм.

Скорость частиц, которая зависит от размера частиц, плотности их материала, траектории движения и мощности распыления, распределена по пятну напыления неравномерно. Особенно сильно изменяется скорость мелких частиц, у которых на периферии пятна она может быть в 3 – 5 раз ниже, чем на оси струи. У более крупных частиц перепад скорости меньше. Мелкие частицы диаметром менее 100 мкм по сравнению с более крупными быстрее набирают скорость в плазме и быстрее её теряют. Наибольшую скорость частицы имеют приблизительно на расстоянии 40 – 60 мм от среза сопла.

Можно считать, что струя напыляемых частиц образует конус, вершина которого при порошковом напылении располагается на срезе сопла, а при прутковом и проволоочном – в точке плавления подаваемого прутка (или проволоки).

Из-за неравномерности ускорения и нагрева частиц напыляемого материала по сечению струи напыления на её периферии они имеют меньшую скорость и температуру. В результате на периферии пятна напыления, сформированного на напыляемой поверхности за один проход горелки, образуется зона с пониженной прочностью осаждённых частиц, принадлежащих либо периферийной, либо приосевой области пятна напыления. Известно, что телесный угол распыления, в пределах которого возможен нагрев частиц до состояния, позволяющего осаждаться им на подложку, меньше для крупных фракций по сравнению с мелкими, при одних и тех же условиях истечения струи.

При напылении полидисперсного материала наблюдается сепарация частиц в струе по размерам, что вызвано в значительной мере поперечным вводом частиц в струю.

Сужение фракционного состава, повышение скорости перемещения плазматрона (или другого распылителя) и снижение концентрации частиц в струе снижает вероятность возникновения слоистости в структуре.

При напылении возможны два случая взаимодействия: между напыляемыми частицами и поверхностью подложки, что приводит к возникновению **адгезии** покрытия к подложке, и между напыляемыми частицами и частицами уже нанесенного покрытия, что вызывает сцепление частиц в покрытии или его **когезию**.

Взаимодействие обусловлено действием сил механического зацепления, слабых невалентных сил взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса) и химических сил связи. Процесс взаимодействия напыляемых частиц с материалом подложки можно представить состоящим из трёх стадий: образование физического контакта, активация контактных поверхностей и образование химических связей на границе раздела частица-подложка, развитие объёмного взаимодействия (релаксация микронапряжений, рекристаллизация, гетеродиффузия, образование новых фаз. Процесс соединения определяется тремя основными параметрами: температурой контакта, длительностью взаимодействия и приложенным давлением, под действием которого, с одной стороны, частицы деформируются и сближаются с атомами подложки, с другой, происходит активация контактной поверхности подложки.

Основные структурные элементы напылённого материала – зерно, частица, слой. В отличие от компактного материала, имеющего два типа границ: межзеренные и межфазные; напылённое покрытие имеет три типа границ, оказывающих существенное, а часто определяющее, влияние на свойства

покрытия: это границы между деформированными частицами, межслойные границы и, наконец, границы, разделяющие покрытие и подложку.

Границы раздела между слоями, полученными за один проход распылителя, возникают из-за различной длительности выдержки между нанесением частиц в слое и между слоями. Поверхность покрытия между слоями загрязняется и контактные процессы под частицами затрудняются.

Эти границы появляются также из-за различия в термоциклах, которые зависят от теплопроводности покрытия, сильно изменяющейся с увеличением его толщины. Часть границы раздела между любыми частицами состоит из площади контактной поверхности в местах схватывания, на которых частицы приварились к подложке или к частицам в покрытии.

Образование напыляемого покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, особенно на стыках частиц. Так как частицы формируются в атмосфере, микрополости заполняются газом.

Вследствие большой шероховатости покрытия, чрезвычайно быстрого растекания и кристаллизации частиц при ударе в зоне контактов ранее нанесённых частиц с поверхностью остаются дефекты и полости. Взаимодействие с атмосферой, адсорбция газов и оседание пылевидных фракций существенно ухудшает свойства межслойной зоны покрытия.

С уменьшением размера напыляемых частиц улучшается заполнение слоя покрытия – его плотность растёт, объём микропустот уменьшается, структура покрытия делается более однородной. Однако слишком мелкие частицы не пригодны для газотермического напыления из ряда соображений: транспортировки и ввода в струю, испарения в струе.

Важное ограничение возникает вследствие того, что газотермическое покрытие образуется из двухфазного потока, состоящего из газа и самих частиц. Частицы с размером менее критического не достигают поверхности изделия, поскольку захватываются и отклоняются потоком газа, обтекающим изделие.

Таким образом, свойства покрытия в целом будут зависеть от процессов, происходящих с частицами при взаимодействии с потоком газа (плазмы) и формировании покрытия на подложке.

Прочность напылённых газотермических покрытий не превышает 10-60 мПа, что на порядок ниже прочности металлов. Такой же уровень имеет величина адгезионной прочности покрытия. Вследствие больших остаточных напряжений, покрытия толщиной 0,5-1,0 мм склонны к самопроизвольному отслаиванию. Низкая прочность покрытий объясняется их строением и условиями, при которых они образуются.

Причины низкой прочности заключаются в макростроении покрытий. Напыленные материалы состоят из отдельно сравнительно слабо связанных между собой частиц. Объёмное взаимодействие на участках контакта между частицами практически отсутствует. Кроме того, покрытия отличаются пористостью, и в них всегда имеются значительные остаточные напряжения.

Остаточные напряжения в покрытиях возникают в результате разницы теплофизических свойств материалов частицы и подложки, появляются после остывания нанесённого покрытия. Макротермические циклы в пятне напыления объясняются действием струи нагретого распыляющего газа и массы нагретых частиц, образующих покрытие. Эти термоциклы имеют гораздо большую длительность и менее высокую максимальную температуру по сравнению с термоциклами в контакте застывающих частиц.

Исходя из характера и места разрушения покрытий, можно считать, что их прочность определяется силами сцепления между частицами, а не прочностью самих частиц.

При охлаждении в напылённых деталях и покрытиях возникают сложные поля остаточных напряжений. Эти поля зависят от неравномерного распределения наносимого материала в струе и неравномерного нагрева детали вследствие местного характера действия источника напыления, а также особенностей формы и размеров защищаемой детали.

В зависимости от соотношения между прочностями сцепления покрытия с подложкой и частицами в покрытии разрушение может быть адгезионным или когезионным. Часто наиболее слабым местом является зона сцепления между частицами покрытия, прилегающими к подложке, поэтому при разрушении часть покрытия остаётся на подложке. Низкая прочность покрытия в этой зоне объясняется отрицательным влиянием высокой теплопроводности компактной массивной подложки на термические циклы в контакте частиц второго, третьего и т.д. слоёв вблизи подложки. По мере роста толщины покрытия его теплопроводность понижается, температура в контакте увеличивается и прочность покрытия растёт.

Несмотря на ясность основных физических процессов, вызывающих остаточные напряжения в напылённых покрытиях, в настоящее время ещё не разработаны методы их инженерной оценки. Это объясняется не только сложностью, но и многосторонностью рассматриваемых теплофизических, физико-химических и других явлений, ответственных за прочность покрытий.

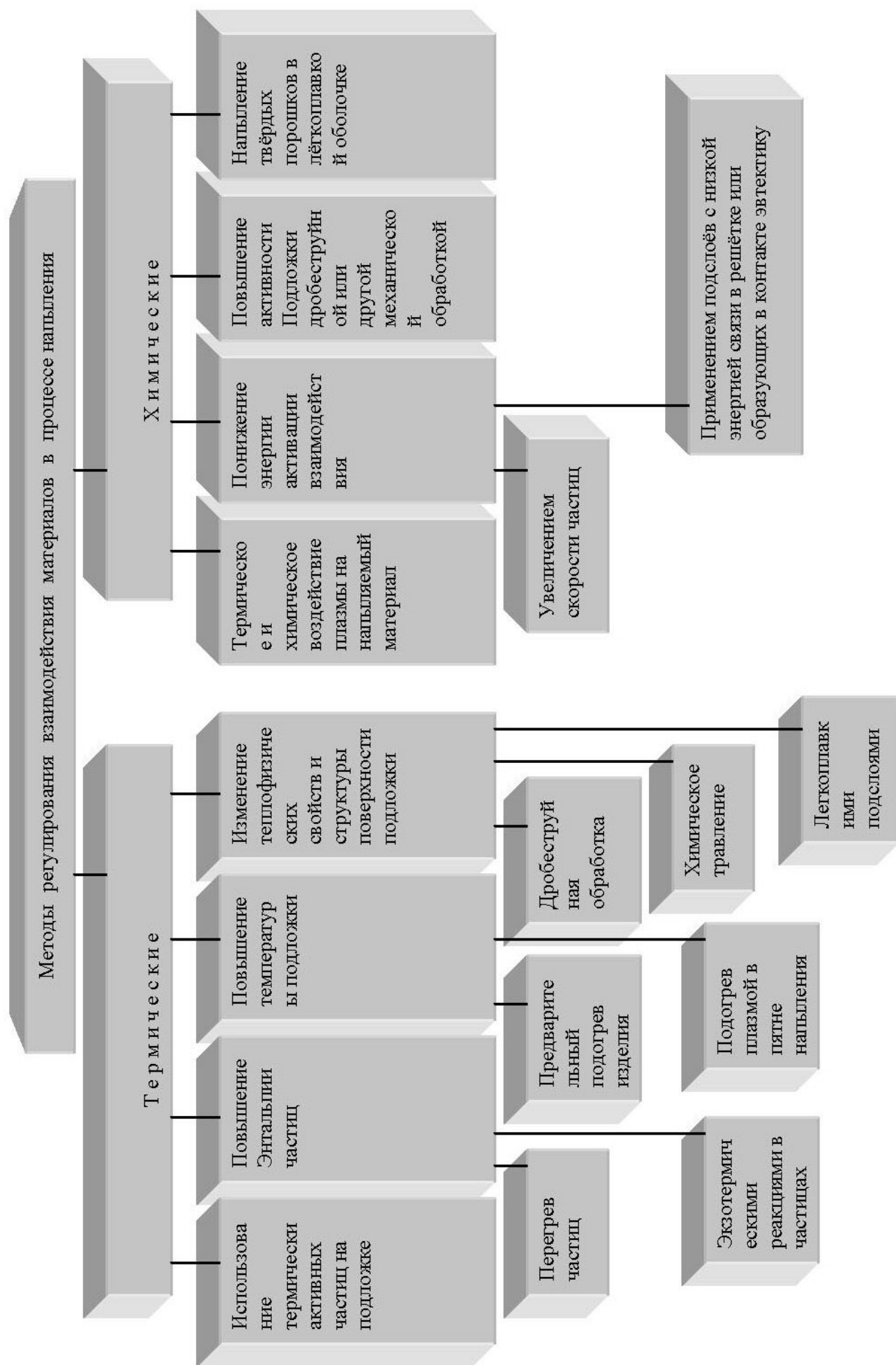
Известны следующие технологические приёмы, позволяющие регулировать остаточные напряжения в покрытиях, а, следовательно, их прочность:

1. Согласование свойств материалов покрытия и подложки и, в первую очередь, их коэффициентов термического расширения.

2. Регулирование термического воздействия газотермического потока на частицы и подложку путём изменения распределения его тепловой мощности по пятну нагрева, а также регулированием дистанции напыления или изменением скорости перемещения горелки (распылителя).
3. Снижение модуля упругости материала покрытия, например, введением в него добавок пластичного материала.
4. Использование подслоёв между подложкой и покрытием, обеспечивающих плавный переход свойств от материала подложки к материалу покрытия.
5. Изменение толщины покрытия, а также применение многослойных покрытий с чередованием слоёв из различных материалов.
6. Армирование покрытия непрерывными или дискретными волокнами или проволоками.
7. Изменение формы напыляемой поверхности, например, придание определённого радиуса кривизны всем острым углам изделия.

В литературе приводятся данные по остаточным напряжениям в зависимости от различных факторов режима напыления, свойств исходного материала подложки и последующей обработки покрытия. Встречаются противоречивые данные исследователей, объясняемые неточностью методов определения и отсутствием сведений о физико-механических свойствах исследуемых покрытий. Обычно эти данные относятся к частным конкретным случаям и без знания условий образования покрытия, формы образца и т.д., дают мало информации и не позволяют установить общих закономерностей.

Настоящий обзор был составлен в период 1986-1989 гг. и отредактирован в августе 2008 года.



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Сарбучев С.Н.

Для расчета формирования газотермических покрытий из потока распыляемого материала получена формула толщины покрытий, использующая понятие «плотность потока» и «поверхностная плотность потока». Приводятся примеры расчетов цилиндрического и конического потоков.

При газотермическом напылении покрытие формируется при перемещении пятна потока распыляемого материала по напыляемой поверхности. Обычно покрытие наносится послойно, за несколько проходов распылителя (плазматрона, газовой горелки, электрометаллизатора). Изменение толщины покрытия по напыляемой поверхности, как за один проход, так и в целом, совместно с другими параметрами, определяет свойства покрытия [1]. При движении пятна по поверхности остается его след. След пятна по напыляемой поверхности иногда называют валиком [2]. След в сечении, перпендикулярном движению пятна, имеет некоторое распределение по толщине. Например, это распределение может быть гауссовым или параболическим.

Формирование покрытия в точке А зависит от параметров потока напыляемого материала и характера перемещения пятна напыления. Его скорость определяется геометрией поверхности и перемещениями распылителя (рис. 1).

Перемещение пятна можно в общем виде описать с помощью вектора скорости распылителя и радиуса-вектора, точка А в пятне напыления, характеризующего направление и расстояние до распылителя. Поток напыляемого материала можно характеризовать его плотностью в сечении, перпендикулярном потоку

$$G = \frac{d^2 W}{dt dS_{\perp}} \quad (1)$$

где G — плотность потока, м/с; W — объем распыляемого материала, м³; dt — время, с; dS_{\perp} — площадь напыления, перпендикулярная потоку, м².

Плотность потока — величина векторная. Направление вектора совпадает с прямой, проведенной из точки напыляемой поверхности и точки распыления. Модуль вектора определяется формулой (1).

Для процесса нанесения покрытия на некоторую поверхность dS , ориентированную произвольным образом к вектору \mathbf{G} , целесообразно воспользоваться понятием поверхностной плотности потока G_s . Из непрерывности потока следует, что объемы напыляемого материала на площадки dS и dS_{\perp} одинаковы

$$G dS_{\perp} dt = G_s dS dt \quad (2)$$

После преобразования получаем

$$\frac{\mathbf{G}}{G_s} = \frac{dS}{dS_{\perp}} \quad (3)$$

Из соотношения $dS_{\perp} = dS \cos \alpha$, где α — угол между площадками, следует

$$\frac{\mathbf{G}}{G_s} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (4)$$

Пятно проходит через точку А по некоторому пути L (рис. 1). В окрестностях точки А поверхности F можно выделить элементарную площадку dS , касательную к поверхности F в точке А. На отрезке dL напыление происходит при постоянной скорости пятна и постоянной G^* . При перемещении пятна на dL за время dt в точке А толщина покрытия увеличится на $d\delta_A$.

$$d\delta_A dS = G_s dt dS \quad (5)$$

Откуда следует, что

$$d\delta_A = G_s dt \quad (6)$$

При прохождении через точку А всего пятна толщину покрытия можно определить из выражения

$$\delta_A = \int_{t_0} G_s dt \quad (7)$$

где δ_A — толщина покрытия в точке А; G_s — поверхностная плотность потока в точке А; t_0 — время нахождения точки А в зоне пятна.

Рис. 1. Схема газотермического напыления на сложные поверхности (F — поверхность; V_n — скорость пятна потока на поверхности)

Рис. 2. Схема напыления цилиндрической поверхности коническим потоком. Пятно напыления совершает винтообразное движение

Решение уравнения (7) для некоторых частных случаев представляет практический интерес.

Однако вследствие того, что поток напыляемого материала имеет коническую форму и неравномерное распределение плотности по своему сечению, получение аналитических зависимостей сопряжено со значительными трудностями. Поэтому целесообразно воспользоваться методами вычислительной математики и возможностями компьютеров.

Для некоторой расчетной точки A , расположенной на пути движения пятна напыления по поверхности F , формирование покрытия начинается в момент попадания в зону пятна (рис. 1).

При расчете принимается, что напыление элементарной площадки dS в окрестности точки A осуществляется цилиндрическим потоком. Перемещение потока за малый интервал времени Δt приводит к тому, что площадка dS напыляется уже другим цилиндрическим потоком, у которого изменилось направление и модуль вектора потока. Для расчета прироста толщины покрытия $\Delta \delta$ в точке A за малый интервал времени Δt можно использовать формулу

$$\Delta \delta = G_{SA} \Delta t, \quad (8)$$

где G_{SA} - поверхностная плотность потока в точке A .

Время пребывания расчетной точки A в зоне пятна можно разбить на малые интервалы времени Δt_i . Следовательно, итоговая толщина покрытия в данной точке

$$\delta = \sum_{i=1}^N G_{SA} \Delta t_i, \quad (9)$$

здесь N - число интервалов времени, на которое разбито все время нахождения точки A в зоне пятна.

В случае формирования многослойных покрытий зона напыляемой поверхности разбивается с помощью фиксированных точек A на интервалы ΔL_j . Расчет для некоторой точки A_j производится по формуле (9), а для многослойного покрытия, состоящего из K слоев, осуществляется суммированием

$$\delta_j = \sum_{k=1}^M \delta_k. \quad (10)$$

где δ_j - толщина многослойного покрытия в точке A ; δ_k - толщина одного слоя покрытия; M - общее число слоев.

Формулу профиля покрытия в зоне экранирования можно получить интерполяцией по δ_j . Моменты начала и окончания формирования покрытия в расчетной точке определяются условиями

напыления и формой напыляемой поверхности. Плотность потока можно найти экспериментально, измеряя покрытие на плоскости при неподвижном распылителе.

Форму поперечного сечения такого покрытия можно описать какой-либо аналитической зависимостью, однако такое описание вносит ошибку, часто существенную.

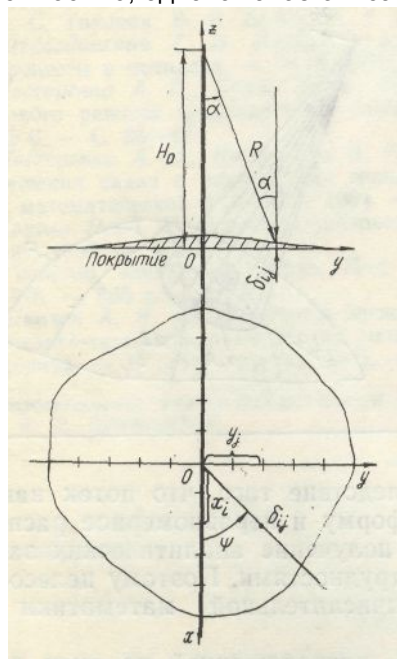


Рис. 4. Схема экспериментального определения матрицы G_{ij} .

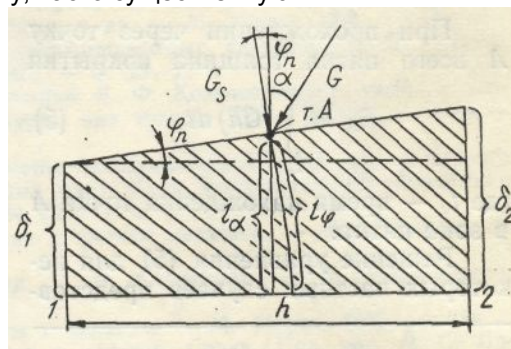


Рис. 3. Схема формирования покрытия на отрезке h при разной скорости роста трещины в точках 1 и 2.

Менее наглядно, но точнее отражает распределение толщины покрытия по пятну матрица значений толщин покрытия, измеренных в некотором образом упорядоченных точках напыляемой поверхности, например, в узловых точках сетки (рис. 4). Каждая точка (x_i, y_i) имеет свое значение толщины покрытия δ_{ij} , такая матрица может храниться в памяти компьютера.

Как следует из формулы (8), поверхностная плотность потока

$$G_s = d\delta / (dt) \cong \Delta \delta / (\Delta t), \quad (11)$$

где $\Delta \delta$ - приращение толщины покрытия за время Δt .

Плотность потока в точке (x_i, y_i)

$$G_{ij} = d\delta / (dt \cos \alpha), \quad (12)$$

где α - угол между радиусом-вектором точки (x_i, y_i) и осью z (рис. 4)

$$\cos \alpha = H_0 / (\Delta t \cos \alpha), \quad (13)$$

где H_0 - дистанция напыления.

Расчет выполняется для сечения, перпендикулярного оси потока. Для расчета плотности потока в произвольной точке потока надо пересчитать координаты (x, y, H) как исходной матрицы, так и этой точки в сферические (α, ψ, R) . Вместо радиуса-вектора R можно использовать высоту конуса H , поскольку она имеет аналитическую зависимость $H = R \cos \alpha$. По углам α и ψ определяют из исходной матрицы плотность потока на высоте H_0 и по формуле

$$G_p = GH_0^2 / H^2, \quad (14)$$

вычисляют плотность потока на высоте H .

Не исключена погрешность в определении G_{ij} вследствие изменения угла между вектором плотности потока и нормалью к напыляемой поверхности в точке расчета, вызванного разностью скоростей роста покрытия в двух соседних точках (рис. 3). Угол α увеличивается на величину φ_n . При этом покрытие растет не по отрезку l_α а по фактическому пути l_φ .

Таким образом,

$$\Delta \delta / h = \tan \varphi_n, \quad (15)$$

где $\Delta \delta = \delta_2 - \delta_1$; δ_1, δ_2 — толщины покрытия в точках 1 и 2.

С целью обеспечения максимальной точности определения плотности потока G , можно оценить допустимые значения φ_n . Предположим, что необходима точность не менее Π (%), т.е.

$$G_\alpha / G_\varphi = (100 - \Pi) 0,01, \quad (16)$$

где G_α - расчетная плотность потока; G_φ - истинная плотность потока.

Тогда

$$G_\alpha = l_\alpha / \Delta t \cos \alpha, \quad (17)$$

$$G_\varphi = l_\varphi / \Delta t \cos(\alpha + \varphi_n), \quad (18)$$

$$G_\alpha / G_\varphi = l_\alpha \cos(\alpha + \varphi_n) / \cos \alpha. \quad (19)$$

Поскольку отношение $(l_\alpha / l_\varphi) < 1$, то ошибка не увеличится, если выражение (18) записать в виде

$$\cos(\alpha + \varphi_n) / \cos \alpha = (100 - \Pi) 0,01. \quad (19)$$

По формуле (19) для данных Π и α можно вычислить значение допустимого угла φ_n , а следовательно, и допустимую разность толщин покрытия на шаге h по формуле (15).

Напыление плоскости цилиндрическим потоком. Плотность потока перпендикулярна поверхности напыления, следовательно $G=G_s$.

$$t_0 = \frac{D}{V_p} = \frac{2}{V_p} \sqrt{D_0^2 / 4 - x^2} \quad (20)$$

где D — хорда окружности пятна; V_p — скорость распылителя; D_0 — диаметр окружности пятна напыления; x — расстояние от D_0 до D . Из формулы (7) следует, что в этом случае

$$\delta_A = G_s t_0 = G \frac{2}{V_p} \sqrt{D_0^2 / 4 - x^2} \quad (21)$$

Формула (9) определяет распределение толщины покрытия за один проход распылителя в сечении валика, перпендикулярном скорости пятна V_n .

Напыление цилиндрической поверхности коническим потоком (рис.2). Получение аналитических зависимостей напыления коническим потоком представляет значительные трудности. Поэтому целесообразно воспользоваться методами вычислительной математики, использовать возможности компьютера.

Ограничения задачи заключаются в том, что напыляемая цилиндрическая поверхность совершает равномерное вращение, распылитель равномерно перемещается вдоль оси поверхности, а модуль вектора G в плоскости, перпендикулярной оси потока, постоянный. При расчете принимается, что напыление элементарной площадки dS в окрестностях точки A осуществляется цилиндрическим потоком. Перемещение точки приводит к тому, что площадка dS напыляется уже другим цилиндрическим потоком, у которого изменилось направление и модуль вектора потока. Расчетная точка A движется по винтовой линии, поэтому координаты точки можно определить с помощью параметрических уравнений:

$$X = v t \quad (22)$$

$$Y = R \cos \omega t \quad (23)$$

$$Z = R \sin \omega t \quad (24)$$

где v — скорость перемещения точки по оси X ; R — радиус цилиндрической поверхности; ω — угловая скорость перемещения точки A ; t — время.

Используем формулу (7). За время Δt точка A переместится по винтовой линии на расстояние ΔL и толщина покрытия в точке A возрастет на $\Delta \delta$

$$\Delta \delta = G_{SA} \Delta t \quad (25)$$

где G_{SA} — проекция вектора плотности потока на нормаль к цилиндрической поверхности в точке A .

Поверхностную плотность потока в точке A G_{SA} можно определить как скалярное произведение вектора плотности потока и единичного вектора нормали напыляемой поверхности

$$G_{SA} = (Gn) \quad (26)$$

Определим проекции (координаты) вектора G на координатные оси X, Y и Z

$$G\{G_x; G_y; G_z\} \quad (27)$$

Длина образующей конуса в точке A

$$l_A = \sqrt{x_A^2 + y_A^2 + (H_0 - z_A)^2} \quad (28)$$

Направляющие косинусы образующей конуса l_A равны

$$\cos \alpha_x = \frac{x_A}{l_A}; \quad \cos \alpha_y = \frac{y_A}{l_A}; \quad \cos \alpha_z = \cos \alpha = \frac{H_0 - z_A}{l_A}; \quad (29)$$

С помощью найденных косинусов можно найти координаты вектора G . Их знак определяют координаты точки A X_A и Y_A . Знак G_z всегда отрицательный согласно расчетной схеме

$$G_x = G \frac{x_A}{l_A}; \quad G_y = G \frac{y_A}{l_A}; \quad G_z = -G \frac{H_0 - z_A}{l_A}; \quad (30)$$

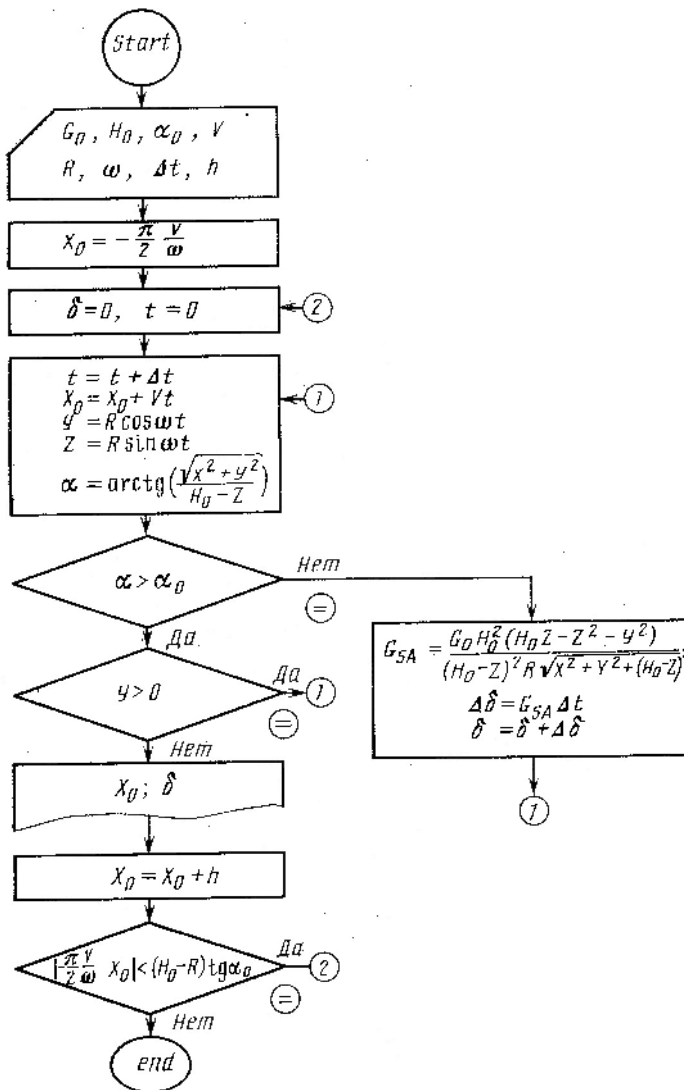


Рис. 5. Алгоритм расчета распределения толщины покрытия в сечении валика по схеме рис. 2. G_0 — плотность потока на некотором расстоянии от точки распыления H_0 ; плотность потока G по сечению, перпендикулярному его оси, постоянна; $G = G_0 H_0^2 / H^2$ — плотность потока на некотором расстоянии от точки распыления H ; α_0 — угол конуса потока; V — скорость перемещения пятна по оси OX ; R — радиус напыляемой поверхности; ω — угловая скорость вращения поверхности; Δt — интервал времени между расчетными точками; h — шаг расчета по оси OX ; x_0 — начальная точка расчета по оси OX ; t — время; α — угол между радиусом-вектором из точки P текущей расчетной точки и осью OZ ; G_{SA} — поверхностная плотность потока в точке A ; $\Delta \delta$ —

Координаты единичного вектора \mathbf{n} равны

$$\mathbf{n} \{n_x; n_y; n_z\}; \quad n_x = 0; \quad n_y = -\cos \varphi; \quad n_z = -\sin \varphi \quad (31)$$

Таким образом, поверхностная плотность потока в точке A равна

$$G_{SA} = (\mathbf{Gn}) = G_x n_x + G_y n_y + G_z n_z = -\frac{G}{l_A} [(H_0 - z_A) \sin \varphi + Y_A \cos \varphi] \quad (32)$$

Используя полученные зависимости, составим алгоритм расчета для ЭВМ распределения толщины покрытия в сечении валика плоскостью ZOX . Сечение симметрично относительно оси OZ . Алгоритм составлен для случая, когда весь поток напыляемого материала встречается с поверхностью. Для случая, когда часть потока проходит мимо поверхности, алгоритм будет иной.

Выводы. Получены аналитические зависимости для расчета толщины газотермических покрытий, а также предложена методика экспериментального определения плотности потока напыляемого материала. Предложен алгоритм расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В. В. Нанесение покрытий распылением. // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов (к 70-летию академика Н. Н. Рыкалина). М.: Наука, 1973. 158 с.
2. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 87 с.

Работа написана в период 1986-1987 гг.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ЗАЩИТНОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЛТЕЛЕЙ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Сарбучев С.Н.

В практике упрочнения и восстановления деталей машин с использованием технологий газотермического напыления имеют место случаи сколов и отслоений газотермических покрытий на краях как плоских, так и сложных поверхностей. Эти дефекты покрытий обусловлены остаточными напряжениями покрытий, некачественной подготовкой края напыляемой поверхности, ошибками при проектировании защитной оснастки напыляемых деталей.

Существуют технологические приемы подготовки краёв напыляемых деталей: наварка и нарезка буртиков, пазов, установка специальных шпилек и т.д. Однако эти приёмы усложняют технологию нанесения покрытия, а иногда и неприменимы, например, из-за снижения усталостной прочности деталей.

В настоящее время ещё не разработаны инженерные методы расчёта остаточных напряжений, возникающих на краях газотермических покрытий.

Краевые дефекты покрытий возникают не только из-за отслоений, вызванных действием остаточных напряжений, но и при механической обработке покрытий (сколы, трещины и т.д.). При удалении технологической оснастки, при напрессовке, случайных ударах и т.д.

При движении пятна напыления по напыляемой поверхности на защитную оснастку (экран) происходит экранирование потока. По напыляемой поверхности начинает двигаться тень от оснастки в сторону, противоположную движению пятна напыления.

Таким образом, под защитной оснасткой формируется покрытие с переменной толщиной. Форма краевой галтели определяется параметрами потока, кинематикой пятна напыления и его формой, а также конструкцией теневой защитной оснастки.

Конструкции оснастки могут быть различны, в зависимости от напыляемой поверхности. Геометрия оснастки может изменяться во всех трёх пространственных координатах, а также во времени.

Представляет практический интерес сочетание управления в процессе формирования покрытия теневой защитной оснасткой и формой, а также распределением потока напыляемого материала.

На рис. 1 приведена классификация теневых защитных экранов, а на рис. 2 типы экранов

Классификация экранов

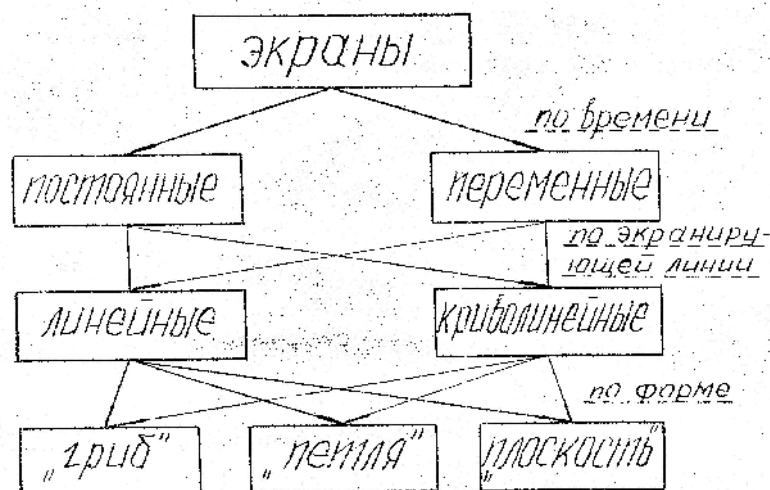


Рис. 1.

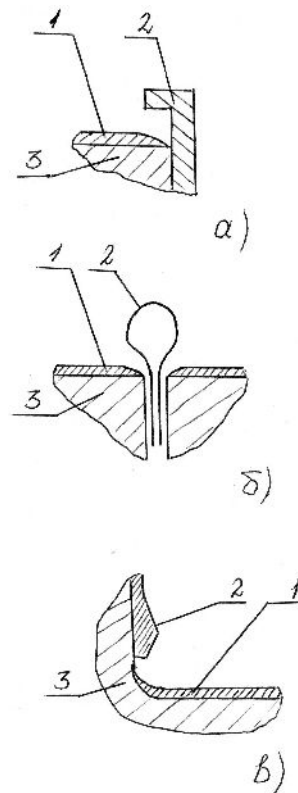


Рис. 2. а) «гриб», б) «петля», в) «плоскость».

1. покрытие, 2- петля, 3- основа.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА МАТЕРИАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ.

Сарбучев С.Н.

Стоимость процесса складывается из затрат на напыление, предварительную подготовку поверхности (струйно-абразивную, механическую и термическую обработку), а также на другие вспомогательные операции. Основные затраты (материальные и временные) составляют затраты на напыление (C_H) и струйно-абразивную обработку (C_{ACO});

$$C = C_H + C_{ACO}$$

Стоимость напыления в свою очередь складывается из затрат на напыляемый материал (порошок или проволоку) – C_M , воду (C_B), газ (C_G) и электроэнергию (C_E):

$$C_H = C_M + C_B + C_G + C_E$$

Стоимость струйно-абразивной операции - затраты на сжатый воздух ($C_{ВОЗД}$) и электрокорунд (дробь) – $C_{ЭК}$:

$$C_{ACO} = C_{ВОЗД} + C_{ЭК}$$

Стоимость напыляемого материала можно представить следующим образом:

$$C_M = \frac{W \rho_0 \lambda_M}{k}$$

где: W – объем напыляемого материала (m^3);
 ρ_0 – плотность напыляемого материала (kg/m^3);
 k – коэффициент использования материала;
 λ_M – удельная стоимость напыляемого материала (руб/кг);

Обозначим $\rho = \frac{\rho_0}{k}$ – "кажущаяся" плотность покрытия.

$$C_M = \frac{W \rho \lambda_M}{\tau_H \times V_G \lambda_G}$$

где: τ_H – время напыления (сек);
 V_G – расход газов ($m^3/сек$);
 λ_G – удельная стоимость газов (руб./ m^3)

$$\tau_H = \frac{W \rho}{G_M}$$

где: G_M – расход напыляемого материала (кг/сек);
 Следовательно:

$$C_A = \frac{W \rho}{G_M} V_A \lambda_A ;$$

$$C_E = N \tau_H \lambda_{YE} = N \frac{W \rho}{G_M} \lambda_{YE} ;$$

$$C_{ACO} = \left(\frac{R_{aiqa}}{G_{ACO}} \lambda_{aiqa} + R_{YE} \lambda_{YE} \right) S ;$$

где: $R_{ВОЗД}$ – расход воздуха ($m^3/сек$);
 G_{ACO} – производительность струйно-абразивной обработки ($m^2/сек$);
 $\lambda_{ЭК}$ – удельный расход электрокорунда (кг/ m^2);
 N – электрическая мощность установки (кВт);
 $\lambda_{ЭЛ}$ – удельная стоимость электроэнергии (руб/кВт*час);
 $\lambda_{ЭК}$ – удельная стоимость электрокорунда (руб/кг);
 S – площадь напыляемой поверхности (m^2).

$$C = \frac{W \rho \lambda_M}{\tau_H \times V_G \lambda_G} + \frac{W \rho}{G_M} R_B + \frac{W \rho}{G_M} V_A \lambda_A + N \frac{W \rho}{G_M} \lambda_{YE} + \left(\frac{R_{aiqa}}{G_{ACO}} \lambda_{aiqa} + R_{YE} \lambda_{YE} \right) S ;$$

где: R_B – расход воды ($m^3/час$)
 λ_B – удельная стоимость воды (руб/ m^3).

Приведём полученную формулу к удобному для дальнейшего использования виду:

$$C = \left[W\rho \left(\lambda_M + \frac{R_B}{G_M} \lambda_B + \frac{V_A \lambda_A}{G_M} + \frac{N \lambda_{YE}}{G_M} \right) + \left(\frac{R_{AC\bar{A}}}{G_{ANI}} \lambda_{AC\bar{A}} + R_{YE} \lambda_{YE} \right) S \right]; \quad (1)$$

Проведём числовую оценку входящих в формулу (1) членов в расчете на 1 см² напыляемой поверхности при следующих исходных данных:

Следует заметить, что нижеприведённые расчёты проведены в середине 80-х годов прошлого столетия на основании действующих в то время цен. Действующие в начале XXI века цены сильно отличаются от нижеприведённых, но методика подхода к расчёту материальных затрат остаётся неизменной.

W	$= 1 \cdot 10^{-7} (\text{м}^3)$ (при толщине покрытия 1 мм);
ρ_M	$= 12 \cdot 10^3 (\text{кг/м}^3)$;
λ_M	$= 15 (\text{руб./кг})$;
G_M	$= 2 (\text{кг/час})$;
G_{ACO}	$= 40 (\text{см}^2/\text{мин}) = 0,24 (\text{м}^2/\text{час})$;
R_B	$= 8 (\text{л/мин}) = 0,48 (\text{м}^3/\text{час})$;
λ_B	$= 0,18 (\text{руб./м}^3)$;
$\lambda_{ВОЗД}$	$= 0,00035 (\text{руб./м}^3)$;
V_{Γ}	$= 1 (\text{л/сек}) = 3,6 (\text{м}^3/\text{час})$;
λ_{Γ}	$= 0,06 (\text{руб./м}^3)$ (по стоимости азота);
N	$= 100 (\text{кВт})$;
$\lambda_{эл}$	$= 0,02 (\text{руб./кВт} \cdot \text{час})$;
$R_{ЭК}$	$= 0,1 (\text{кг/м}^2)$;
$\lambda_{ЭК}$	$= 0,05 (\text{руб./кг})$;
S	$= 1 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2)$.

$$C = 1 \cdot 10^{-7} \cdot 12 \cdot 10^3 (15 + 0,48/2 \cdot 0,18 + 3,6 \cdot 0,06/2) + 1 \cdot 10^{-4} \cdot 420/0,24 \cdot 0,00035 + 0,1 \cdot 0,05 = 12 \cdot 10^{-4} (15 + 0,04 + 0,1 + 1) + 1 \cdot 10^{-4} (0,6 + 0,005) = (193,68 + 0,605) \cdot 10^{-4} = 194,285 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, стоимость напыляемого материала составляет от общей стоимости (C) – 92,6%

стоимость воды – 0,247%;

стоимость газа – 0,616%;

стоимость электроэнергии – 6,16%;

стоимость струйно-абразивной обработки – 0,311%.

Следовательно, если использовать для расчета (оценки) материальных затрат при плазменном напылении только затраты на напыляемый материал и электроэнергию, а также с учетом того, что наиболее целесообразно, использовать замкнутый контур охлаждающей воды, ошибка при расчетах не превысит 1%.

Однако, при использовании азотно-аргоновых газовых смесей и напыляемых материалов удельной стоимостью менее 15 руб./кг, ошибка возрастает и при стоимости материала 5 руб./кг достигает величины 12%*

Из вышеизложенного следует, что для оценки материальных затрат при плазменном напылении можно использовать формулу:

$$C = \left[W\rho \left(\lambda_M + \frac{N}{G_M} \lambda_{YE} \right) \right]; \quad (2)$$

В формулу (2) входит стоимость напыляемого материала и электроэнергии, следовательно ее можно использовать не только для оценки затрат при плазменном напылении, но и для электродуготовой металлизации, а при замене затрат на электроэнергию затратами на ацетилен и кислород - для газопламенного напыления.

По формуле (2) с помощью ЭВМ может быть сделан расчет для различных значений W , ρ , λ_M , N , G_M , сведенных в таблицы.

Для удобства практического использования по формуле (2) составлены соответствующие диаграммы (Рис.1).

Пример построения одной из диаграмм приводится на рис. 2.

Поле диаграммы разбито на четыре квадранта, в квадранте 1 (на основе опытных работ или экспертной оценки) на оси (G_M) выбирается точка 1. В квадранте 1 построена зависимость $\left(\frac{N}{G_M} \lambda_{YE} \right)$ от G_M при постоянном значении N (потребляемой электрической мощности установки). От точки 1, "отражаясь" от линии ($N=\text{const}$), переходим к точке 2. получаем значение $\left(\frac{N}{G_M} \lambda_{YE} \right)$, её размерность (руб./кг).

Во втором квадранте построена зависимость

$$\rho \left(\frac{N}{G_M} \lambda_{\dot{Y}E} + \lambda_M \right) \text{ от } \left(\frac{N}{G_M} \lambda_{\dot{Y}E} + \lambda_M \right) \text{ при}$$

постоянным значением ρ ($\rho = \text{const}$).

На оси $\left(\frac{N}{G_M} \lambda_{\dot{Y}E} + \lambda_M \right)$ к стоимости выбранного материала для напыления λ_M прибавляем

значение $\rho \left(\frac{N}{G_M} \lambda_{\dot{Y}E} + \lambda_M \right)$, полученное в 1 квадранте, находим точку 3. От точки 3 "преломляясь" на

линии $\rho = \text{const}$ получаем точку 4. По точке 4 находим точку 5 в III квадранте. В третьем квадранте построена зависимость удельных (на 1 см²) затрат ($C_{уд}$) при заданной толщине покрытия от значения

$$\rho \left(\frac{N}{G_M} \lambda_{\dot{Y}E} + \lambda_M \right).$$

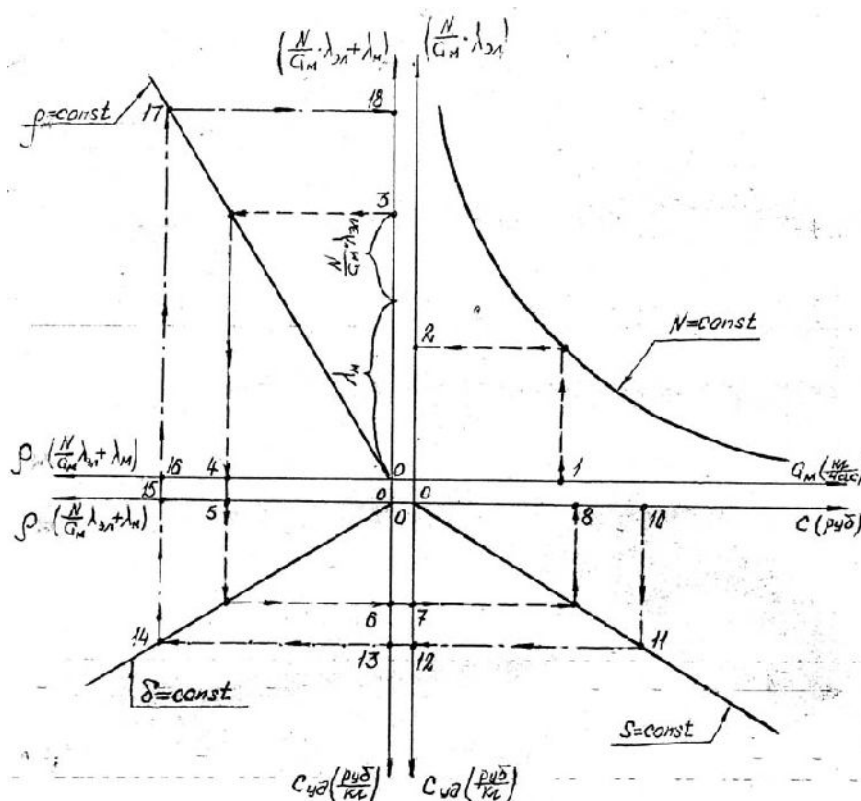


Рис.1

максимально необходимое значение толщины покрытия (δ), находим соответствующую прямую $\delta = \text{const}$ в III квадранте, точка 14. На основании экспертной оценки определяем возможный материал покрытия и находим во II квадранте линию $\rho = \text{const}$, а, следовательно, точку 17. По точке 17 находим точку 18. Эта точка определяет максимально возможную стоимость материала покрытия. Таким образом, параметры покрытий, значения которых находятся внутри многоугольника 10-11-12-14-15-17-18-0-10, обеспечат экономическую эффективность внедрения технологии.

Для оценок и технологических расчетов при разработке и внедрении технологии построены и другие диаграммы, из которых составляется специальный альбом.

Таким образом, в настоящей работе предложена методика оценки материальных затрат при газотермическом напылении, применимая для широкой гаммы напыляемых материалов, деталей и служебных свойств покрытий.

Настоящая методика разработана в 1984-1986 годах, новая редакция март 2007 года.

От точки 5, "преломляясь" на линии $\delta = \text{const}$, получаем точку 6. По точке 6 находим точку 7 в IV квадранте. В четвертом квадранте построена зависимость стоимости напыления (C) от величины удельных затрат ($C_{уд}$) при постоянном значении величины напыляемой площади (S).

Предложенной диаграммой удобно пользоваться для выбора материала и толщины покрытия исходя из того, чтобы стоимость восстановления детали не превышала некоторого значения. Например, себестоимости восстановления детали по существующей на предприятии технологии.

Точка 10 на оси (C) (см. рис.2) определяет максимально допустимую стоимость восстановления детали. Зная площадь поверхности, требующую восстановления, определяем линию $S = \text{const}$ точка 11, а следовательно, и $C_{уд}$ (точка 12). Задавая некоторое

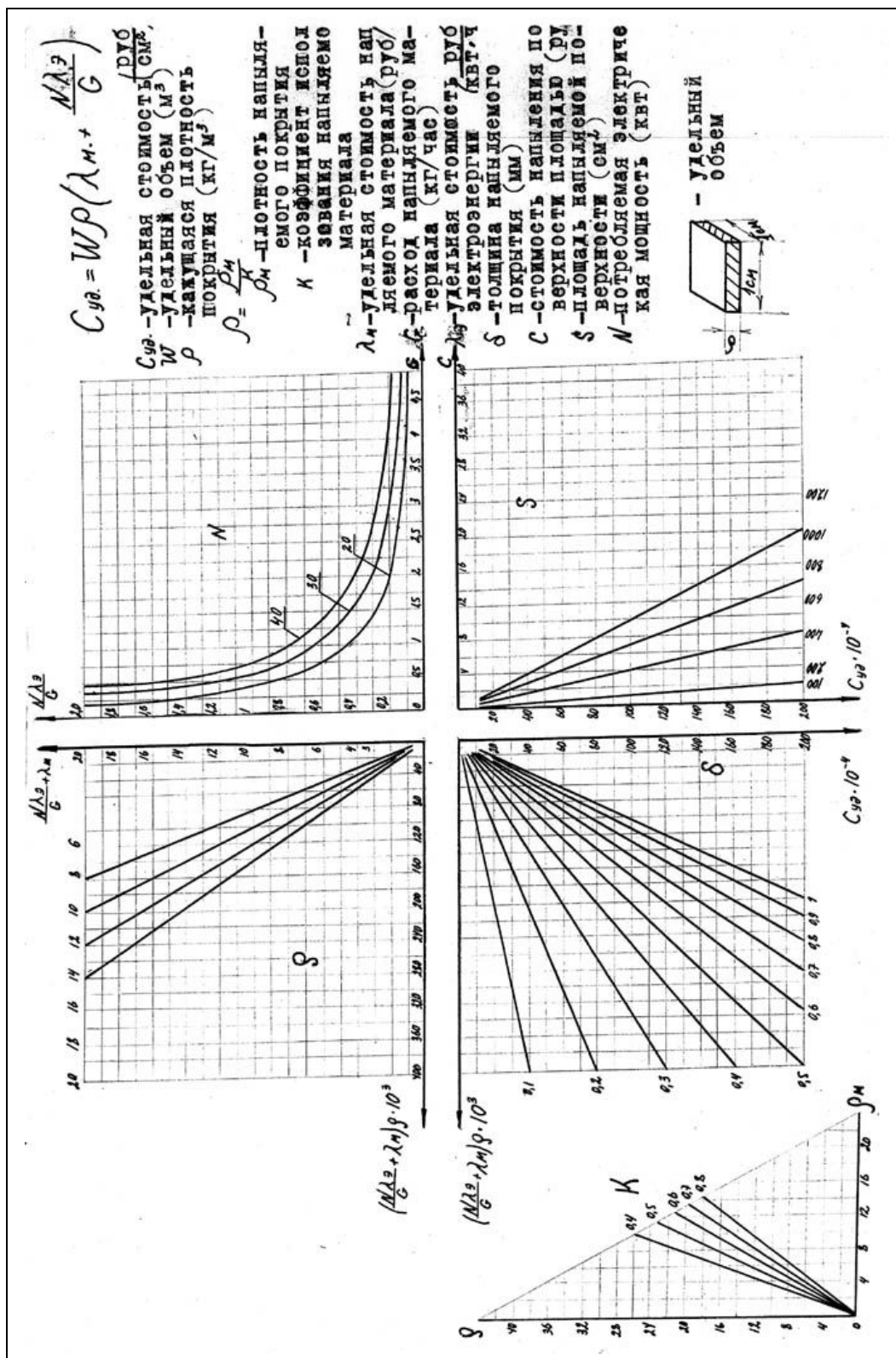


Рис.2.

Развитие электродуговой металлизации с момента своего зарождения в начале 20-ого века и по настоящее время (март 2009 года), позволяет классифицировать конструкции электродуговых металлизаторов по основным конструктивным схемам. Возможно классифицировать металлизаторы по типу привода подачи проволоки: пневмопривод или электропривод; а также по технологическому исполнению: ручные или стационарные. Приведённая ниже классификация касается только соплового узла металлизатора, так как от его конструкции зависит структура и качество покрытия.

1. С центральным распыляющим соплом.

Эти конструкции металлизаторов наиболее простые и удобные в обслуживании и, в тоже время, позволяют получать покрытия с необходимым качеством для многих целей. Проволоки подаются в точку схождения и горения дуги по токоведущим направляющим (наконечникам) под углом около 30° . Распыляющий газ (обычно воздух) подаётся из центрального сопла. Ось потока газа лежит в плоскости осей токоведущих наконечников. Электрическая дуга стабилизируется в потоке газа. Важно добиться минимальной экранировки газового потока токоведущими наконечниками и следить за сходимостью проволок. Сходимость нарушается из-за износа каналов, по которым проходит проволока. Для уменьшения износа целесообразно использовать проволоку с полированной поверхностью и без поверхностных загрязнений. Требование по чистоте поверхности проволоки относится ко всем металлизаторам, вне зависимости от конструкции. Существенным фактором для стабилизации электрической дуги является температура вылета проволоки. Принято называть вылетом проволоки её отрезок от среза токоведущего наконечника до точки её плавления. Проволока нагревается от проходящего по ней тока и от тепла, выделяющегося в катодном или анодном пятне дуги. Температуру вылета проволоки можно регулировать длиной вылета проволоки. Длина вылета проволоки подбирается опытным путём для каждой проволоки и для каждой конструкции металлизатора. Расчётных зависимостей пока не существует.

Для схемы распыления с центральным соплом характерно наличие поперечной составляющей потока газа для поперечного срыва пятна дуги на конце проволоки (на обоих концах). Можно с высокой степенью достоверности предполагать, что эта составляющая негативно влияет на стабилизацию дуги и диспергацию материала проволок. При такой схеме истечения газа, газ имеет возможность рвать дугу не только где-то посередине между концами проволоки, но и на концах проволок, с которых горит дуга.

1.1. Для нанесения покрытий на внутренние поверхности иногда используют два газовых потока: один распыляет, а второй, расположенный на некотором расстоянии от дуги, поток заворачивает под некоторым углом (обычно $45^\circ - 90^\circ$). Ось второго потока расположена в плоскости симметрии первого потока и токоведущих наконечников. Эту конструкцию можно отнести к схеме распыления с центральным соплом. Угол, под которым второй поток встречается с распылённым металлом, подбирается опытным путём. К недостаткам этой схемы можно отнести некоторое захлаживание потока распылённого металла и, как следствие, снижение коэффициента использования материала. В тоже время, происходит меньший нагрев подложки. Эта схема наиболее перспективна для нанесения покрытий на внутренние поверхности с малым диаметром.

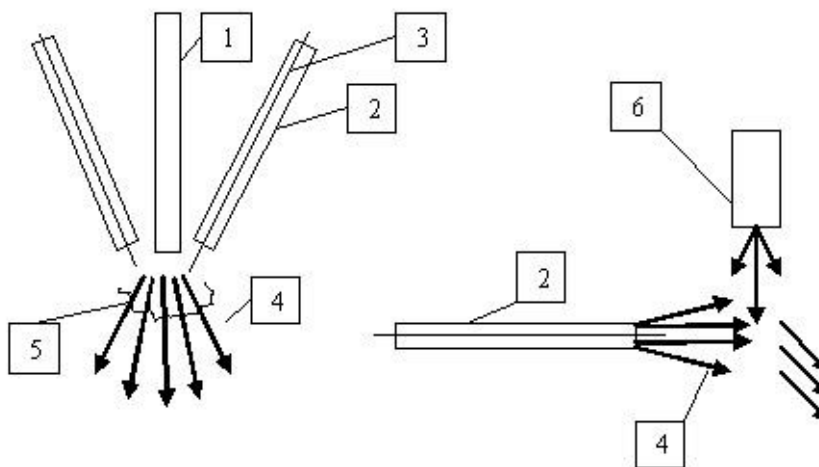


Рис. 1 (вид сверху).

Рис. 1-1 (вид сбоку).

- 1- центральное распыляющее сопло; 6- второй поток.
- 2- токоведущие наконечники;
- 3- проволока;
- 4- газовый поток;
- 5- дуга;

2. «Закрытая схема распыления».

Так принято называть конструкцию металлизатора с диафрагмирующим колпачком. Колпачок, ввод воздуха (газа) под колпачок и расположение токоведущих направляющих, являются основным конструктивным отличием данной схемы от предыдущей с центральным соплом. Эти отличия дают новое качество покрытия. Поток воздуха (газа) попадает сначала под колпачок, а затем, обжимая дугу и образующийся поток из газа и частиц металла, разгоняя его, вырывается наружу. Концентрация воздушного потока (его диафрагмирование) приводит к концентрации дуги (то есть пространства, занимаемого ею из условий её оптимального существования), к лучшей её стабилизации, а также концентрации (фокусировке) потока напыления, состоящего из воздуха (газа) и частиц металла, направляющегося к подложке. Поток газа в диафрагма может быть не один, а два и более. Также могут быть дополнительные потоки газа за соплом (диафрагмой) для изменения геометрии потока.

Концентрация потока напыления ведёт к более равномерному прогреву напыляемых частиц металла и к более равномерной эпюре их скоростей в потоке. Следствием является повышение качества покрытий.

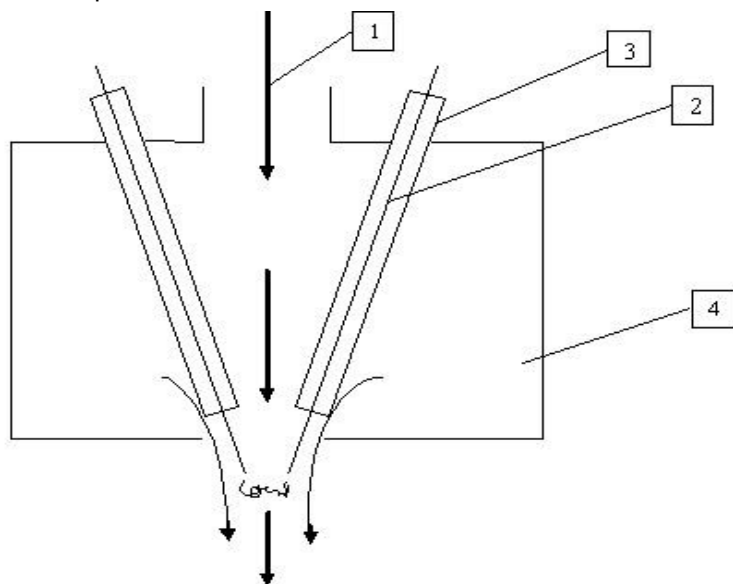


Рис. 2 «Закрытая» схема напыления.

- 1 - газ;
- 2 - проволока;
- 3 - токоведущие наконечники;
- 4 - диафрагмирующий колпачок.

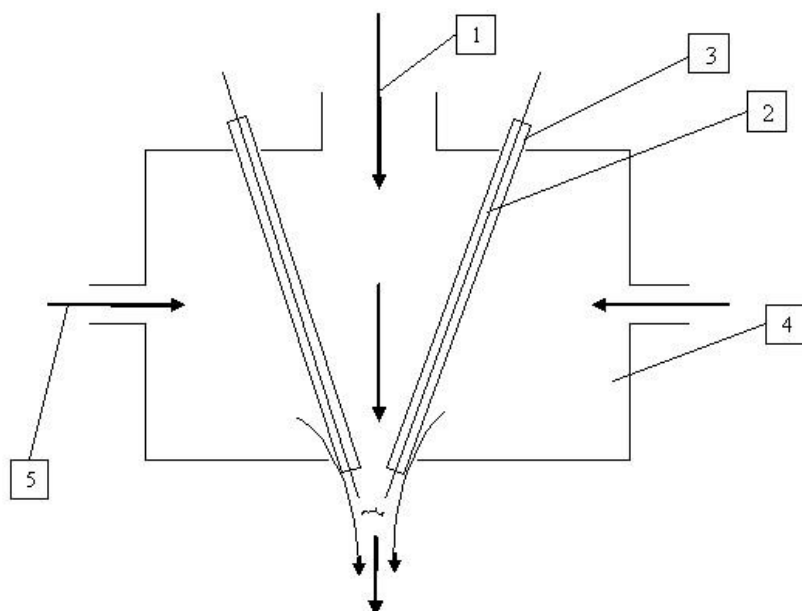


Рис. 2-1 «Закрытая» схема напыления с дополнительной подачей газа.

- 1 - газ;
- 2 - проволока;
- 3 - токоведущие наконечники;
- 4 - диафрагмирующий колпачок;
- 5 - дополнительная подача газа.

2.1. Следует отметить разновидность «закрытой схемы распыления»: дополнительная подача газа (воздуха) под диафрагмирующий колпачок. Это приводит к увеличению расхода газа в диафрагме для обжатия дуги и потока напыления и к усилению фокусировки. Увеличивается мощность потока, в первую очередь, скорость потока.

Для некоторых распыляемых материалов, например, для порошковых проволок, это имеет положительное значение. Возрастает плотность покрытия. Покрытия по свойствам становятся аналогичны высокоскоростным способам напыления (например, сверхзвуковое газопламенное напыление). Так как при сверхзвуковых способах напыления обычно используются порошки, то применение порошковых проволок для некоторых применений становится предпочтительным.

3. Сопловой узел канального типа.

Если подавать распыляющий газ (воздух) вдоль токоведущих наконечников металлатора, то сопловой узел существенно меняет свою конструкцию, становится более сложным в обслуживании. Однако, качество покрытия и производительность напыления возрастают.

Газ подаётся вдоль наконечников по коаксиальным каналам. Поэтому эту схему распыления назвали «канального типа». Газ симметрично истекает вдоль наконечников и, соответственно, вдоль проволок. На концах проволок поток газа истекает параллельно опорным участкам дуги, он не рвёт дугу, а локализует, обжимая её, на начальных участках её горения. Основной столб дуги выдувается и растягивается потоком газа, имея возможность прерываться где-то посередине. Это приводит к росту напряжения на дуге и её мощности, что позволяет плавить больше металла проволок, то есть увеличивается производительность напыления. Коаксиальное истечение газа приводит также к равномерному распылению материала проволоки в отношении дисперсности частиц. Частицы имеют небольшой разброс по размеру, в сравнении с другими схемами распыления.

При такой схеме распыления расширяется зона устойчивости дуги и тем самым, диапазон регулирования режимов напыления по току, напряжению и расходу газа.

Использование диафрагмирующего колпачка приводит к результату, описанному в пункте 2.1.

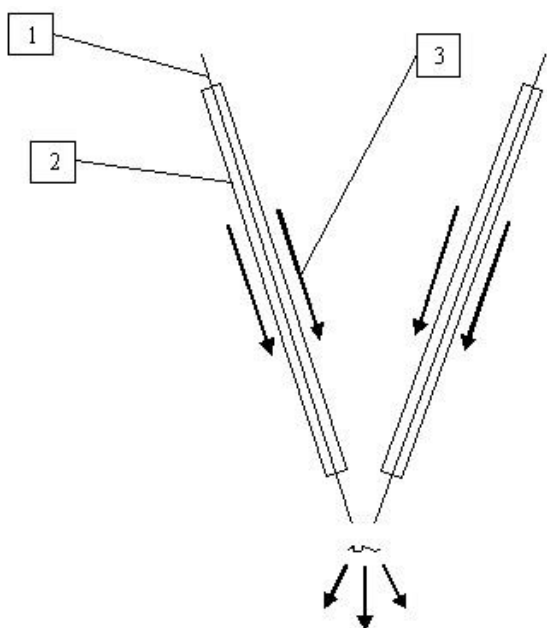


Рис. 3 Сопловой узел канального типа.

- 1 - проволока;
- 2 - токоведущие направляющие;
- 3 - подача газа (воздуха);

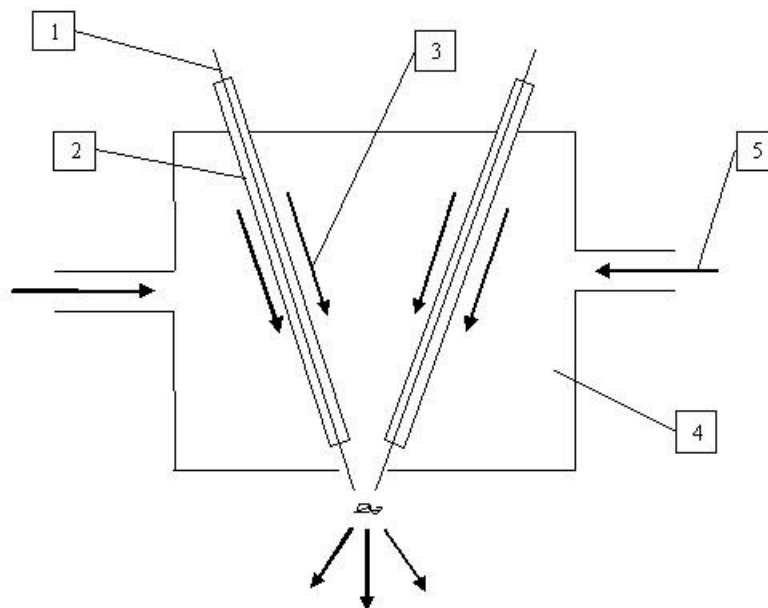


Рис. 3-1 Сопловой узел канального типа с дополнительной подачей газа.

- 1 - проволока;
- 2 - токоведущие направляющие;
- 3 - подача газа (воздуха);
- 4 - диафрагмирующий колпачок;
- 5 - дополнительный газ;

Автор благодарит Чистую Анну Александровну и Кириенко Веронику Юрьевну за техническую помощь в написании настоящей статьи.

12 марта 2009 года